

Strukturelle Klebungen mit UV- und lighthärtenden Acrylaten

Structural Bonded Joints with
UV and Light Curing Acrylates

Von der Fakultät Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Dresden
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Iris Vogt
geboren am 30.03.1967 in Grünstadt

Erster Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller Technische Universität Dresden
Zweiter Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Bernd Zastrau Technische Universität Dresden
Dritter Gutachter	Prof. Christian Meyer, Ph.D., M.S. Columbia University in the City of New York
Tag der Verteidigung	30.03.2009

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Iris Vogt

Strukturelle Klebungen mit UV- und lichthärtenden Acrylaten

Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2009

ISBN 978-3-86780-129-4

© 2009 Iris Vogt

Technische Universität Dresden
Fakultät Bauingenieurwesen
Institut für Baukonstruktion
D-01062 Dresden

Telefon +49 351 463 34845
Telefax +49 351 463 35039

www.bauko.bau.tu-dresden.de

**So eine Arbeit wird eigentlich nie fertig, man muss sie
für fertig erklären, wenn man nach Zeit und Umständen
das möglichste getan hat.**

Goethe über sein Werk ‚Iphigenie‘
Caserta, 16. März 1787

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner langjährigen Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baukonstruktion der Technischen Universität Dresden. Den Großteil erstellte ich im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen geförderten Forschungsverbundprojekts zwischen der Industrie und forschenden Instituten.

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Bernhard Weller, der mich während meiner Zeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin stets gefördert und unterstützt hat. Seine vielfältigen fachlichen Anregungen und motivierenden Gespräche mit ihm haben entscheidend zum Erfolg dieser Arbeit beigetragen.

Herrn Professor Bernd Zastrau danke ich sowohl für seine zahlreichen und wertvollen Hilfestellungen als auch für seine große Geduld, mir die Grundzüge der Technischen Mechanik wieder in Erinnerung zu rufen.

Meinem dritten Gutachter, Herrn Professor Christian Meyer, möchte ich meinen ganz persönlichen Dank für das Interesse an der Weiterentwicklung des Klebens im Konstruktiven Glasbau und für die Begutachtung der Arbeit ausdrücken.

Allen Institutskolleginnen und -kollegen, die durch ihre wertvollen Ratschläge und ihr Entgegenkommen meine Arbeit unterstützt haben, danke ich ebenfalls. Die angenehme Arbeitsatmosphäre hat die anstrengende Zeit wesentlich vereinfacht.

Ich danke Frau Dr. Irene Jansen und Herrn Hans Sieber vom Klebtechnikum des Fraunhofer Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik für die gute Zusammenarbeit während der Bearbeitung des Forschungsprojekts.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Mann Martin und meinen Kindern Linus, Lilly und Nike, die über einen langen Zeitraum hin den oft nicht einfachen Spagat zwischen unserem Familienleben und meiner Arbeit ermöglichten und mich

in schweren Stunden immer wieder ermutigt haben, an dem begonnenen Weg festzuhalten. Nicht zu vergessen meine Eltern und Schwiegereltern, die einsprangen, wenn Not am Mann war.

Dresden, September 2009

Iris Vogt

Kurzfassung

UV- und lichthärtenden Acrylatklebstoffen steht ein breites Anwendungsspektrum im Konstruktiven Glasbau offen. Ihr farbloses und klares Erscheinungsbild fördert eine Konstruktion, die transparent und leicht wirken soll. Kurze Aushärtezeiten, die sich im Sekunden- oder einstelligen Minutenbereich bewegen, ermöglichen eine schnelle Herstellung und reduzieren die Lagerzeiten. Die geklebten Konstruktionen können direkt weiterverarbeitet werden. Durch diese Vorteile heben sie sich von den Silikonklebstoffen ab, die für ausgewählte Anwendungen im Fassadenbau (Structural-Sealant-Glazing-Systems - SSGS) bauaufsichtlich zugelassen sind.

Gegenstand dieser Arbeit ist die Aufstellung von Empfehlungen zur Planung und Berechnung struktureller Klebungen mit strahlungshärtenden Acrylaten. Dafür werden Klebstoffe an dem reinen Material sowie in Verbindungen mit Glas und Metall untersucht. Für ein umfangreiches Bild über das Verhalten des Materials bieten sich Substanzprüfkörper an, die mit überschaubarem Aufwand eine Auswertung verschiedener Einflüsse - beispielsweise Temperatur und Prüfungsschwindigkeit - erlauben. An in-situ-Prüfkörpern kann der Klebstoff in der Verbindung betrachtet werden. Durch Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Füge teil bildet sich eine sogenannte Grenzschicht aus, die gradierte Eigenschaften besitzt und die Materialkennwerte - besonders bei dünnen Klebfugen - beeinflusst. Weiterhin erlauben diese Prüfkörper eine Aussage über das Tragverhalten der Klebverbindung.

Um das Potenzial der Acrylatklebungen in der Glasarchitektur aufzuzeigen und in der Anwendung zu prüfen, werden Bauteile mit punktförmig geklebten Halterungen untersucht. Absturzsicherungen werden statischen und dynamischen Belastungen unterworfen. An Überkopfverglasungen werden Trag- und Resttragfähigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Bauteile im Freien geben Aufschluss über das Alterungsverhalten unter natürlichen klimatischen Bedingungen.

Abstract

UV and light curing acrylates present a whole host of possibilities for the implementation of glass construction. Their clear and colourless appearance produces a transparent and lightweight construction. Short curing times consisting of no more than mere minutes allow for quick production with minimal downtime within the overall process. Processing can be resumed immediately once bonding has occurred. The advantages of acrylates can be compared to the characteristics and properties of adhesive silicones which have been widely approved by building authorities for specific façade applications (Structural-Sealant-Glazing-Systems - SSGS).

The subject matter of this study is the development of auxiliary tools to plan and design adhesively bonded joints of UV and light curing acrylates. These adhesives are, therefore, analysed both generally as bulk material and in applications as a joint between glass and metal. The use of dog bone shaped specimens is recommended to analyze the material behaviour under a variety of influence factors such as temperature and testing rate. The bonded joints of test specimens provide an opportunity to examine the interaction between the adhesive and the materials to which they are adhered. An interface with graded properties is formed based upon the interactions between adhesive joints and each particular substrate. Further on, bonded specimens enable the development of a statement concerning the load-bearing capacity of joints.

Constructions having spot bonded joints are tested to demonstrate the potential use of acrylic joints in architectural glass treatments. Safety barriers are tested under both static and dynamic loads. Sloped roof systems are tested to substantiate load-bearing capacity and to verify any residual carrying capacity. Components are exposed to natural weathering in order to examine the affects of ageing on the adhesive.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Zielsetzung	3
1.3	Abgrenzung	4
2	Geschichtliche Entwicklung der Klebstoffe	6
3	Kleben im Konstruktiven Glasbau	12
4	Versuchswerkstoffe	17
4.1	UV- und lichthärtende Acrylatklebstoffe	17
4.2	Fügeteile	24
4.2.1	Glas	24
4.2.2	Metall	27
5	Methoden zur Kennwertermittlung	29
5.1	Kennwertermittlung an Substanzprüfkörpern	29
5.2	Kennwertermittlung an in-situ-Prüfkörpern	33
6	Grenzschichtbetrachtung	39
6.1	Grundlagen	39
6.2	Mikrothermische Analyse μ TA™	40
6.3	LWave®	42
7	Kennwertermittlung an Substanzprüfkörpern	44
7.1	Grundlagen	44
7.2	Probengeometrie und Herstellung	45
7.3	Versuchsdurchführung	46
7.4	Variation der Geschwindigkeit	48
7.5	Variation der Temperatur	53
7.6	Variation der Einlagerungsdauer	62
7.7	Dynamisch-Mechanische Analyse	65
8	Kennwertermittlung an der Rohrprobe	69
8.1	Grundlagen	69
8.2	Probengeometrie und Herstellung	70
8.3	Versuchsdurchführung	75
8.3.1	Ermittlung der Dehnung	78
8.3.2	Ermittlung der Gleitung	80
8.4	Auswertung	82

8.5	Ergebnisse für den Photobond 4468	85
8.6	Ergebnisse für den Photobond GB485	93
8.7	Vergleich der Ergebnisse	98
8.8	Vergleich mit Kennwertermittlung an Substanz- prüfkörpern	103
9	Kleinteilversuche - Durchführung	106
9.1	Grundlagen	106
9.2	Probengeometrie und Herstellung	107
9.2.1	Zylinderzugprüfkörper	107
9.2.2	Druckscherprüfkörper	110
9.3	Versuchsdurchführung	111
9.3.1	Durchführung der Zylinderzugversuche	111
9.3.2	Durchführung der Druckscherversuche	113
9.4	Auswertung	114
9.5	Ergebnisse für beide Klebstoffe	117
9.6	Vergleich mit Ergebnissen aus der Rohrprobe	125
9.7	Freibewitterung	126
10	Kleinteilversuche - Berechnung	129
10.1	Zylinderzugversuch	129
10.1.1	Dreidimensionale Modellierung	129
10.1.2	Rotationssymmetrische Modellierung	137
10.1.3	Variantenuntersuchung	143
10.2	Druckscherversuch	149
10.2.1	Modellierung	149
10.2.2	Variantenuntersuchung	154
11	Bauteilversuche - Durchführung	158
11.1	Absturzsicherung	158
11.1.1	Grundlagen	158
11.1.2	Materialien und Klebstoffe	158
11.1.3	Konstruktion und Geometrie	159
11.1.4	Bauteilversuche - Tragfähigkeit unter statischer Belastung	161
11.1.5	Bauteilversuche - Tragfähigkeit unter stoßartiger Belastung	163
11.1.6	Messauswertung	165
11.1.7	Modifizierte Ausführung	170
11.1.8	Experimentelle Ermittlung der Schlagzähigkeit	175

11.2	Überkopfverglasung	183
11.2.1	Grundlagen	183
11.2.2	Materialien und Klebstoffe	183
11.2.3	Konstruktion und Geometrie	184
11.2.4	Bauteilversuche - Prüfung der Tragfähigkeit	187
11.2.5	Bauteilversuche - Prüfung der Resttragfähigkeit	188
11.2.6	Messauswertung	189
11.2.7	Freibewitterung	195
12	Bauteilversuche - Berechnung	199
12.1	Absturzsicherung	199
12.1.1	Modellierung der schmalen Scheibe	199
12.1.2	Modellierung der breiten Scheibe	209
12.1.3	Vergleich beider Systeme	213
12.1.4	Parameterstudie	214
12.1.5	Hinweise und Schlussfolgerungen	223
12.2	Überkopfverglasung	225
13	Empfehlungen:	
	Acrylate im Konstruktiven Glasbau	228
13.1	Vorbemerkungen	228
13.2	Eigenschaften der Klebstoffe	228
13.2.1	Transparenz	228
13.2.2	Temperaturbeständigkeit	229
13.2.3	Feuchtebeständigkeit	230
13.2.4	UV-Beständigkeit	230
13.2.5	Kriechen	230
13.2.6	Feuerbeständigkeit	231
13.3	Entwurf der Klebverbindung	231
13.3.1	Geometrie der Klebfuge	231
13.3.2	Ausbildung der Auflager	232
13.4	Bemessung der Klebverbindung	233
13.4.1	Beanspruchung	233
13.4.2	Materialkennwerte	234
13.4.3	Berechnung	236
13.5	Herstellung der Klebverbindung	237
13.5.1	Vorbehandlung	237
13.5.2	Montage	237
13.5.3	Aushärtung	238
13.6	Überwachung	239
14	Zusammenfassung	240

15	Literatur	244
15.1	Fachbücher und Fachaufsätze	244
15.2	Normen und Richtlinien	248
15.3	Produktdatenblätter	250
15.4	Internetadressen	251
16	Abbildungsverzeichnis	251
17	Bezeichnungen	252
17.1	Formelzeichen	252
17.2	Abkürzung	254
Anhang		255

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Fügung hat bei der Gesamtkonzeption eines Tragwerks und in der Ausbildung seiner Details in der Regel wesentlichen Einfluss auf die Gestaltqualität des Bauwerks. Materialgerechtes Fügen und Verbinden sind häufig entscheidend für die Nachhaltigkeit einer Konstruktion.

Altbewährt sind Schrauben und Nieten als kraftschlüssige oder Bolzen als formschlüssige Verbindungen. Jünger sind die stoffschlüssigen Fügeverfahren wie das Schweißen oder das Kleben. Aufgrund vieler Vorteile wird in Zukunft eine deutliche Zunahme der Klebtechnik erwartet.

In vielen Bereichen der industriellen Herstellung hat sich das Fertigungsverfahren Kleben schon heute etabliert.¹ Neben dem Einsatz in der Elektrotechnik, der Medizintechnik und der Verpackungsindustrie wird das Kleben in großem Umfang im Maschinenbau angewendet.

Seit mehreren Jahrzehnten zählt die Klebtechnik mit zu den wichtigsten Fügeverfahren bei der Herstellung von Automobilen, Schienenfahrzeugen, Schiffen und Flugzeugen. Bekanntes Beispiel ist das Direct Glazing, das Einkleben der Glasscheiben im Karosseriebau.²

Im Bauwesen wird das Kleben als tragende Verbindung seit über hundert Jahren eingesetzt. Zuerst im Ingenieurholzbau: Bereits 1906 wird der erste geleimte Brettschichtbinder patentiert. Deutlich später findet die Klebtechnik im Beton- und Stahlbetonbau Eingang. Wesentliche Anwendungsgebiete sind die Sanierung, Ertüchtigung und Verstärkung von Bau-

¹ Das Fertigungsverfahren Kleben wird nach dem Ordnungssystem der DIN 8580 in die Gruppe Fügen eingeordnet. Die Unterteilung der Fügeverfahren erfolgt in DIN 8593-0. Neben dem Kleben zählen unter anderem Löten, Schweißen und Fügen durch Umformen dazu. DIN 8593-8 bezieht sich auf das Kleben und unterscheidet in Kleben mit physikalisch abbindenden Klebstoffen und in Kleben mit chemisch abbindenden Klebstoffen. Letztere werden zum lastabtragenden Kleben eingesetzt und in dieser Arbeit ausschließlich betrachtet.

² Vorteile der Klebtechnik sind hervorragende Abdichtung und Senkung des Karosseriegewichts, da die Glasscheibe über den aushärtenden Klebstoff zum Konstruktionswerkstoff wird, die Steifigkeit der Konstruktion erhöht und so die Verwendung dünnerer Bleche gestattet. Vergleiche hierzu FCI 2001, Seite 48 ff. und Habenicht 2006, Seite 746.

teilen. Dabei werden Stahllaschen oder Lamellen aus Faserverbundwerkstoffen auf die Betonoberfläche geklebt. Ein junges Beispiel zeigt die Klebverbindung von Bauteilen aus ultra-hochfestem Beton. Im Mauerwerksbau zählen Fugen mit Dünnschichtmörtel seit langem zu den erfolgreichen Klebverbindungen. Im Stahlbau wurden neue Anwendungen der Klebtechnik kürzlich untersucht.³

Im Vordergrund dieser Arbeit stehen Klebsysteme für den Konstruktiven Glasbau.⁴ Das Verbinden von Glas untereinander oder mit der Unterkonstruktion erfolgt im Konstruktiven Glasbau häufig über Punkt- oder Klemmhalter aus Metall. Besonders bei Halterungen, die eine Bohrung im Glas erfordern, treten hohe Spannungsspitzen in der Glasscheibe auf. Diese lokale Beanspruchung im unmittelbaren Auflagerbereich erfordert dickere Scheiben. Zusätzlich verlangt die Sprödigkeit des Materials Glas ein sorgfältiges und genaues Konstruieren, um direkten Kontakt zwischen Glas und Metall zu vermeiden.

Bei Glaskonstruktionen ist es häufig günstiger, Verbindungen über Kleben herzustellen. Neben den Vorteilen, die sich aus den mechanischen Eigenschaften des Materials Glas ergeben, verlangt seine Transparenz eine möglichst filigran wirkende Konstruktion. Befestigungen von Scheiben sollten deshalb minimiert und zurückhaltend gestaltet sein.

Geklebte Konstruktionen im Glasbau, die lastabtragende Funktionen besitzen, können in einem beschränkten Rahmen bereits mit Silikonklebstoffen realisiert werden. Als nachteilig werden häufig die erforderliche Klebfugendicke und das opake Erscheinungsbild des Klebstoffes empfunden. Bedingt durch die chemische Zusammensetzung erreichen sie erst nach einer Aushärtezeit von 21 Tagen ihre vol-

³ Eine einführende Übersicht zur Anwendung der Klebtechnik im Bauwesen gibt Brockmann 2005, Seite 239 ff. Zur ersten Anwendung im Ingenieurholzbau vergleiche Müller 1998, passim. Hinweise zu Anwendungen im Beton- und Stahlbetonbau finden sich bei Ortlepp 2007, Seite 9 ff. und Schmidt 2007, Seite 681 ff. Zum Stand der Klebtechnik im Stahlbau vergleiche Dilger 2007.

⁴ Beanspruchungsgerechtes Konstruieren von Klebverbindungen in Glastragwerken und geeignete Klebsysteme für den Konstruktiven Glasbau sind Gegenstand umfangreicher Untersuchungen an der Technischen Universität Dresden. Vergleiche hierzu vor allem Schadow 2006 und Tasche 2007.

le Einsatzfähigkeit. Die Festigkeit ist dennoch deutlich geringer als die der höherfesten und schnell aushärtenden Klebstoffe. Die lange Aushärtezeit erfordert neben der zeitlichen Planung auch die räumliche Kapazität in den Werkstätten der ausführenden Firmen.

Um die transparente Wirkung der Glaskonstruktionen zu erhöhen, werden strukturelle - das heißt lastabtragende - Klebungen mit UV- und lighthärtenden Acrylaten untersucht. Im Unterschied zu Silikonklebstoffen werden Acrylate bei deutlich höheren Anfangsfestigkeiten mit erheblich geringeren Fugendicken ausgeführt. Die untersuchten Klebstoffe sind volltransparent und mit dem bloßen Auge kaum wahrnehmbar. Die Aushärtung erfolgt mit einer speziellen Lampe, vorzugsweise über UV-Strahlung. Nach einer Bestrahlzeit von einigen Sekunden bis wenigen Minuten ist die Klebung ausgehärtet und sofort belastbar.

Da Acrylatklebstoffe für tragende Verbindungen im konstruktiven Glasbau bisher selten eingesetzt wurden, kann man auf keine verbindlichen Materialkennwerte zurückgreifen, die für Bemessungen geklebter Konstruktionen benötigt werden. Auch sind bislang zu wenige Kenntnisse vorhanden, inwieweit Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit das Materialverhalten beeinflussen. Basierend auf den häufig eingesetzten Metallklebungen existieren bereits Prüfverfahren und genormte Prüfkörpergeometrien, die der Kennwertermittlung dienen.⁵ Wird ein Füge­teil aus Glas verwendet, können viele dieser Verfahren nicht angewendet werden. Modifizierte Aufbauten sind erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Vorrangiges Ziel dieser Arbeit ist es, Hilfestellungen zum Konstruieren und Berechnen von Glas-Metall-Verbindungen mit strahlungshärtenden Acrylatklebstoffen zu erarbeiten. Faktoren, die das Klebstoffmaterial beeinflussen, werden bewertet, um Anwendungsbereiche und Grenzen aufzuzeigen. Neben Versuchen sollen Finite-Elemente-

⁵ Verbreitete Anwendung finden einschnittig überlappte Zugscherprüfkörper nach EN 1465 und EN 14869-2. Eine Weiterentwicklung stellt das Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf geklebter Hohlzylinder nach EN14869-1 dar.

Betrachtungen einen Anhaltspunkt zur Beurteilung der Einflussparameter liefern. Dazu müssen die Materialkennwerte für die Klebverbindung ermittelt werden. Im Gegensatz zu den Fügmaterialien Glas und Edelstahl oder sonstigen Metallen sind für den Klebstoff in der Regel nur unzureichende Angaben zu den Kennwerten vorhanden. Neben der Ermittlung der Materialkennwerte am reinen Klebstoff ist es notwendig, den Klebstoff in der Verbindung mit dem Fügeteil zu betrachten. Durch Wechselwirkungen mit dem Fügeteil zeigt der Klebstoff in der Grenzschicht veränderte Eigenschaften.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die Kombinationen aus mehreren Acrylatklebstoffen und verschiedenen Metallen mit unterschiedlichen Oberflächenbearbeitungen unter vielfältigen Alterungsszenarien betrachten.⁶ In der vorliegenden Arbeit wird die Auswahl an Materialkombinationen bewusst reduziert, um mit verbesserten Messmethoden in weitergehenden Untersuchungen die Eingangsgrößen für die folgenden Berechnungen wirklichkeitsnah bestimmen zu können.

Nach der erforderlichen Ermittlung zutreffender Materialkennwerte an Substanzprüfkörpern und an in-situ-Proben sind verschiedene Klebverbindungen von Glas und Metall nach einem festgelegten Schema zu untersuchen. Neben zahlreichen Kleinteilversuchen an Zylinderzug- und Druckscherproben sind Bauteilprüfungen an Absturzsicherungen und Überkopfverglasungen unerlässlich, um die Übertragbarkeit von Laboruntersuchungen auf Bauteilanwendungen zu gewährleisten. Die Prüfkörper der Kleinteilversuche und der Bauteilanwendungen müssen zu Teilen im Freien gelagert werden, um die Beständigkeit gegenüber natürlichen Bewitterungseinflüssen beurteilen zu können.

1.3 Abgrenzung

Die vorliegende Arbeit untersucht Klebverbindungen vor allem im Hinblick auf baupraktische Anwendungen. Deshalb steht die Prüfung des statischen Kurzzeitverhaltens im Vordergrund. An Kleinteilversuchen wird die Schlagzähigkeit

⁶ Zur ausführlichen Dokumentation und zusammenfassenden Darstellung der Untersuchungen an strahlungshärtenden Acrylaten vergleiche Tasche 2007.

geklebter Verbindungen ermittelt. Die Tragfähigkeit unter schlagartiger Belastung wird in Bauteilversuchen von absturzsichernden Verglasungen getestet. Schlagartige Belastung im Speziellen und dynamische Beanspruchung sind nicht Gegenstand dieser Arbeit. Das Langzeitverhalten unter Belastung, also das Kriechen, soll aufbauend auf bisherige Untersuchungen Gegenstand weiterer Forschung sein.⁷

Untersuchungen und Wertungen zur Klebtechnik werden im Folgenden auf baupraktisch relevante Bereiche beschränkt. Deshalb sind kohäsives Versagen des Klebstoffes in den Substanzprüfkörpern und adhäsives Versagen der Klebverbindung in den Kleinteilversuchen nicht Gegenstand der Betrachtungen. Hierzu gibt es zahlreiche Untersuchungen, die sich intensiv mit den Themen Kohäsion und Adhäsion wie auch mit den gradierten - das heißt veränderten - Klebstoffeigenschaften in der Grenzschicht beschäftigen.⁸

Kennwertermittlungen, Kleinteilversuche und Bauteilversuche werden mit zwei typischen Acrylatklebstoffen eines Herstellers durchgeführt. Die Modifizierung von Zusammensetzung und Eigenschaften der Acrylatklebstoffe ist Gegenstand laufender Industrieforschung. Eine vergleichende Untersuchung dieser Klebstoffsysteme unter Berücksichtigung verschiedener Hersteller ist noch ausstehend.

⁷ Vergleiche hierzu Tasche 2007. Um einen ersten Vergleich zwischen den Acrylaten und Silikonem zu gewinnen, wurden Kriechversuche bei Raumtemperatur durchgeführt. Vertiefende Untersuchungen bei unterschiedlichen Belastungen, Temperaturen und Bewitterungen werden derzeit von der Nachwuchsforschungsgruppe GLASKONNEX an der Technischen Universität Dresden durchgeführt.

⁸ Vergleiche hierzu einführend Habenicht 2006, Seite 324 ff. oder Posart 2005, passim.

2 Geschichtliche Entwicklung der Klebstoffe

Im Jahre 1963 wurden bei Ausgrabungen in der rund 80 000 Jahre alten Neandertaler-Fundstätte in Königsau im Elbe-Saale-Gebiet neben Mammutknochen und Steinwerkzeugen zwei kleine schwarze Klumpen von etwa 2,5 cm Größe gefunden, die die Archäologen zunächst nicht zuordnen konnten.⁹ An ihnen waren Abdrücke einer Steinkante und Holzmaserungen zu erkennen, sowie schwache Abdrücke von Fingerlinien. Diese zeigen den einzigen bis heute bekannten Fingerabdruck eines Neandertalers.

Spätere chemische Analysen aus dem Jahr 1996 ergaben überraschende Ergebnisse. Mit Hilfe der Gaschromatographie und Massenspektrometrie wurde ein hoher Anteil Betulin festgestellt, das vorwiegend in Birkenrinde vorkommt. Anhand der weiteren Einzelbestandteile konnte bewiesen werden, dass es sich bei diesem Material um Birkenpech handelt. Dies ist ein künstlich hergestellter Stoff, dessen Fertigung ein hohes technisches Können erforderte. Im Gegensatz zu Baumharzen ist Birkenpech kein natürlich vorkommender Stoff. Er muss in einer sogenannten 'trockenen Destillation', einem kontrollierten Verschmelzungsprozess, hergestellt werden.



Bild 1 Birkenpech, vor etwa 80 000 Jahren von den Neandertalern hergestellt. Dies ist der erste uns bekannte künstlich hergestellte Klebstoff der Geschichte. Die Neandertaler benutzten ihn vermutlich zur Schäftung eines Steinwerkzeuges in einem Holzgriff.

⁹ Vergleiche hierzu Kuckenburger 2005, Seite 135 ff. und Bolus 2006, Seite 96. Die beiden Fundstücke sind im Landesmuseum für Vorgeschichte in Halle ausgestellt. Den dort vorliegenden Quellen zufolge werden sie in die Altsteinzeit eingeordnet und sogar auf mindestens 125 000 Jahre geschätzt. Vergleiche hierzu LDA 2008.

Dabei wird Birkenrinde unter Luftabschluss mehrere Stunden auf eine Temperatur zwischen 340 °C und 400 °C erhitzt. Um den Verschwelungsprozess in Gang zu halten, darf die Temperatur nicht unter diesen Bereich absinken. Bei Überschreitung des Temperaturfensters wird der Stoff durch Verkohlung zerstört. Den Neandertalern war es möglich, diesen Temperaturbereich ohne Temperaturfühler über mehrere Stunden zu halten. Bemerkenswert ist dabei, dass die Neandertaler keine feuerfesten Gefäße besaßen, um die Verschwelung des Birkenpechs durchzuführen. Möglicherweise - und das ist bis heute noch nicht geklärt - gelang ihnen dieser Prozess mit Hilfe erhitzter Steine in einer abgedeckten Erdgrube.

Werkzeuge, die aus einer Zeit von vor 40 000 Jahren stammten, wurden in Umm el Tiel in Syrien gefunden.¹⁰ Als Klebstoff wurde Bitumen verwendet, das ebenfalls unter hohen Temperaturen und unter Luftabschluss hergestellt wurde. Ein vor etwa 8 000 Jahren hergestellter Klebstoff wurde im Nahal Hemar Grab in Israel entdeckt. Einige Artefakte wiesen Reste von Kollagen¹¹ enthaltenden Materialien auf, die vermutlich aus Tierhäuten gewonnen wurden. An weiteren Fundstellen von Bestattungsorten aus der Zeit von etwa 4000 v. Chr. entdeckte man getöpferte Gefäße, die zerbrochen und mit Baumharz wieder zusammengefügt wurden. In Tempelanlagen des ehemaligen Babylons aus der gleichen Zeitepoche wurden Statuen ausgegraben, bei denen Augäpfel aus Elfenbein mit einem teerartigen Stoff in die Augenhöhlen geklebt wurden. Diese Klebungen sind heute nach etwa 6 000 Jahren immer noch intakt.

¹⁰ Die Zusammenfassung der folgenden Absätze basiert auf Adams 2005, Seite 3 ff. und Brockmann 2005, Seite 5 ff. In ersterem ist die geschichtliche Entwicklung des Klebstoffes ausführlich und mit Zitaten aus diversen Werken zusammengefasst wurde. Weiterhin sind zahlreiche Verweise auf Bibelstellen genannt und die wohl bekannteste Anwendung eines Klebstoffes in einer Sage: Dädalus und Ikarus flohen aus ihrer Gefangenschaft auf Kreta unter Verwendung von Flugmaschinen, an denen sie Federn mit Wachs befestigt, also geklebt hatten. Ikarus flog zu nahe an die Sonne, das Wachs schmolz, die Klebverbindungen versagten und er stürzte ab.

¹¹ Leimgebende Substanz, die vorwiegend in tierischen Körperteilen, wie Bindegewebe, Häute, Knorpel, Knochen oder Sehnen enthalten ist. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 142 f.

Auch bei 'Ötzi', dem in den Ötztaler Alpen gefundenen Similaun-Mann aus der Jungsteinzeit, etwa 3500 v. Chr., wurden Waffen gefunden, bei denen Feuerstein und Kupfer mit einem klebstoffähnlichen Material an einem hölzernen Stiel befestigt waren. Analysen identifizierten auch hier die Verwendung von Birkenpech.

Im Altertum war Bitumen als Klebstoff weit verbreitet. Eines der am besten erhaltenen Beispiele seiner Verwendung ist in den Ruinen von Babylon aus der Zeit von 1500 v. Chr. zu finden. Zum Kleben von Lehmziegeln wurde Bitumen mit Füllmaterial angereichert.

Die alten Ägypter wandten Klebstoff in vielfältiger Weise an, zum Beispiel für Verbindungen von Holz, Einlege- und Furnierarbeiten aus Holz, Goldbeschichtungen, als Bindemittel in Farbe und Pigmenten oder zur Reparatur von Alabastergefäßen. Neben Harzen und Bienenwachs wurden unter anderem Eiweißstoffe, Gips, Natron und Stärke eingesetzt. Ein eindeutiger Nachweis der Verwendung von Klebstoff befindet sich im Grab des Rekhmara in Theben aus der Zeit Thotmoses III., etwa 2000 v. Chr.¹² Auf einer Skulptur ist der Prozess des Klebens eines Holzfurniers auf ein dickeres Brett in Einzelschritten dargestellt.

Eine weitere interessante Entdeckung aus dieser Zeit ist die Verwendung einer Prothese eines Zehs bei einer Mumie aus Theben, etwa 600 v. Chr. Sie wurde mit Hilfe von Stoffbahnen hergestellt, die mit tierischen Klebstoffen durchfeuchtet waren. Durch die weiche und hautfarbene Oberfläche ähnelt sie den heute verwendeten Prothesen.

Theodoros von Samos hat etwa 530 v. Chr. das 'Zusammenleimen von Metallen' erwähnt. Unklar ist jedoch, ob es sich hier tatsächlich um die erste lastabtragende Klebung handelt oder ob dieser Ausdruck bildlich eine feste Verbindung beschreibt. Die vermutlich erste niedergeschriebene Rezeptur stammt von dem Benediktinermönch Theophilus, etwa 1100 n. Chr. In seinem Werk ist die Herstellung von

¹² Vergleiche hierzu Knight 1931, Seite 3 ff.

Klebstoff auf Kaseinbasis¹³ detailliert beschrieben. Weiterhin gab Theophilus Hinweise zur Qualitätskontrolle bei Verwendung von tierischen Leimen.

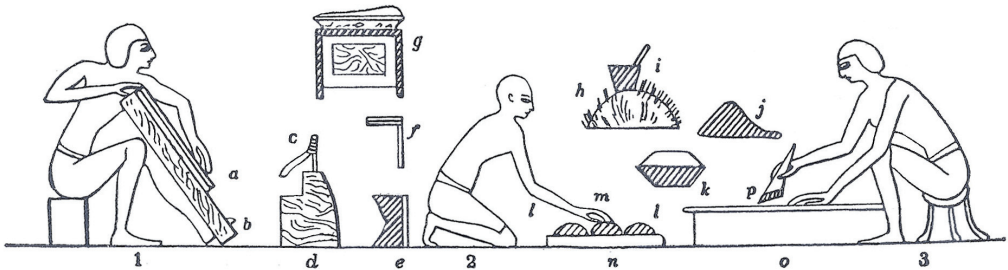


Bild 2 Klebprozess zur Herstellung von Furnierarbeiten. Strichzeichnung nach einer Darstellung auf einer Skulptur am Grab des Rekmara in Theben, etwa 2000 v. Chr. Besonders interessant ist die Darstellung der Figur 1, die eine dünne Platte (a) auf ein dickeres Brett (b) leimt. Figur 3 trägt mit dem Pinsel (p) den Leim auf. Dieser wurde im Leimtopf (i) auf dem Feuer (h) erwärmt. Gekennzeichnet sind noch weitere Werkzeuge und Materialien.

Im 17. Jahrhundert begann sich die Klebstoffindustrie zu etablieren. Vorher lediglich in kleinen Mengen hergestellt, wurde nun die Produktion des Klebstoffes in größeren Anlagen durchgeführt. Von Holland im Jahre 1690 ausgehend, wurde die Klebstoffindustrie etwa 1700 in England eingeführt.¹⁴ 1754 wurde erstmalig ein britisches Patent zur Herstellung von Klebstoff aus Fischleim vergeben. In den nächsten hundert Jahren folgten weitere Patente zur Herstellung von Klebstoffen, die auf Basis verschiedener tierischer Stoffe, wie Tierknochen oder Fischleim, beruhten. Zu

¹³ Kasein oder auch Casein ist der wichtigste Eiweißbestandteil der Milch. Kaseinklebstoffe verfügen sowohl auf trockenen als auch auf nassen Oberflächen über gute Haftungseigenschaften. Das heutige Haupteinsatzgebiet liegt in der Flaschenetikettierung. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 144.

¹⁴ Vergleiche hierzu Gerngross 1933, Seite 126.

Beginn des 19. Jahrhunderts breitete sich dann die Klebstoffindustrie in Frankreich um Lyon aus, von wo aus sie in Europa die Vorherrschaft errang. Aber auch von Deutschland aus expandierte die Klebstoffindustrie in europäische Nachbarländer.

In den USA begann die industrielle Produktion von Klebstoff ab 1810. Ihre Zentren lagen um Boston, New York, Philadelphia und Cincinnati. Amerikanische Regelungen für das Kleben mit tierischen Leimen wurden von Peter Cooper¹⁵ etwa 1822 aufgestellt. Er stellte Testmethoden zur Klassifizierung der Steifigkeit eines Klebstoffes auf, um diese in konstanter Qualität zu produzieren. Diese behielten lange Gültigkeit und bildeten die Grundlage für weiterentwickelte Herstellungs- und Prüfprozesse.

Obwohl Klebstoffe vielfältig eingesetzt wurden, durchliefen sie in den letzten Jahrhunderten nur eine geringe Entwicklung. Bis 1920 wurden Klebstoffe weiterhin auf natürlicher Basis für tragende Verbindungen auch im Flugzeug- und Automobilbau verwendet. Letztendlich wurden sie in den folgenden 20 Jahren durch moderne Klebstoffe ersetzt, die auf Basis synthetischer Polymere hergestellt wurden. Beginnend mit der Herstellung von Polyvinylacetat, einem bis heute oft verwendeten synthetischen Rohstoff, schreitete die Klebstoffentwicklung nun rasch voran. Ein weiterer Durchbruch gelang mit der Entwicklung der polyvinylformal-modifizierten Phenolharz-Klebstoffe, die einen großen Beitrag zur Verbesserung geklebter Strukturen im Flugzeugbau leisteten. Noch heute werden sie wegen ihrer hohen Alterungsbeständigkeit besonders für Aluminiumklebungen geschätzt.

Die Geschichte des Silikons begann 1823 mit der Entdeckung des Siliziums durch Jöns Jakob Berzelius.¹⁶ Um 1910

¹⁵ Peter Cooper war ein Industrieller und Erfinder aus New York, der unter anderem die erste amerikanische Lokomotive entwickelte und baute. Neben dem erfolgreichen Aufbau einer Klebindustrie, führte er Neuerungen in der Stahlherstellung und der Telefonverbindungen ein. 1859 gründete er 'The Cooper Union for the Advancement of Science and Art' in New York, das als eines der ersten Colleges Kindern aus der Arbeiterklasse kostenlose Bildung anbot. Heute noch gewährt dieses College allen Studenten ein volles Stipendium. Vergleiche hierzu Adams 2005, Seite 14 und Cooper 2008.

¹⁶ Vergleiche hierzu den ausführlichen geschichtlichen Abriss in Noll 1960, Seite 13 ff. und CES 2008.

erzielte Frederick Stanley Kipping die Synthese der Silikonkomponenten und kreierte den Namen Silikon. Zeitgleich im Jahr 1940, aber unabhängig voneinander, erfanden die Chemiker Richard Müller¹⁷ und Eugene G. Rochow ein Verfahren zur Direktsynthese von Silikonvorprodukten. Diese sogenannte Müller-Rochow-Synthese wurde zur industriellen Herstellung von Silikonen verwendet.

Acrylatklebstoffe wurden erstmalig 1873 aufbereitet. Die Polymerisation etwa sieben Jahre später war die Grundlage der Entwicklung des breiten Spektrums der Acrylate. Neben den in dieser Arbeit untersuchten lichthärtenden Acrylaten wurden beispielsweise auch anaerob härtende Acrylatklebstoffe sowie die weit verbreiteten und als Sekundenklebstoff bekannten Cyanacrylate entwickelt.¹⁸

Bereits 1937 wurden Polyurethane von Otto Bayer patentiert. Erst etwas später wurden sie verbreitet eingesetzt und zählen jetzt zu den wichtigsten Basisstoffen in der Klebstoffindustrie.

Epoxidharze werden seit 1944 eingesetzt. Mit ihrer breiten Palette von kalt- bis warmhärtenden Systemen zählen sie zu den Standardprodukten des strukturellen Klebens.

¹⁷ Richard Müller forschte in der Chemischen Fabrik v. Heyden in Radebeul, der späteren Arzneimittelfabrik Dresden. Von 1954 bis 1972 lehrte er an der Technischen Universität Dresden als Leiter des Instituts für Silikon- und Fluorcarbonchemie. Zusammen mit dem US-amerikanischen Chemiker Eugene G. Rochow wurde ihm am 22.09.1992 die Ehrendoktorwürde verliehen. "Als Anerkennung der hervorragenden Leistungen auf dem Gebiet der siliziumorganischen Chemie. Insbesondere werden dabei die grundlegenden Arbeiten zur großtechnisch anwendbaren Synthese von Methylchlorsilanen, die Forschungsbeiträge zur Entwicklung der siliciumorganischen Chemie und die langjährige Lehrtätigkeit an der TUD gewürdigt", vergleiche hierzu TU-Dresden 2008 und Altner 2005, Seite 35 f. und Seite 138.

¹⁸ Die große Gruppe der Acrylatklebstoffe wird in Kinloch 1987, Seite 182 ff. und Hartshorn 1986, Seite 217 ff. vorgestellt.

3 Kleben im Konstruktiven Glasbau

Das Kleben von Glas hatte seinen Anfang im Möbelbau. Unter Verwendung von strahlungshärtenden Klebstoffen wurden transparente Glas-Glas-Verbindungen geschaffen, die letztendlich außer dem Eigengewicht nur geringe Lasten aufzunehmen hatten. Mittlerweile kann auf lastabtragende Klebungen im Konstruktiven Glasbau nicht mehr verzichtet werden. Sie werden vorzugsweise flächig oder linienförmig ausgeführt.

Zu den flächigen Klebungen im Konstruktiven Glasbau, die teilweise bereits bauaufsichtlich eingeführt sind, zählen die Herstellung von Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas, beispielsweise mit Ethylenvinylacetatfolie, Gießharz oder Polyvinylbutyral-Folie (PVB).¹⁹ Dieser Verbund wird als Laminieren bezeichnet. Aufgrund des temperatur- und belastungsabhängigen Schubspannungs-Gleitungs- und Kriechverhaltens darf die Verbundwirkung weder in Spannungs- noch in Durchbiegungsnachweisen angesetzt werden.²⁰

Empfehlungen für linienförmige Klebungen in Fassadenkonstruktionen werden durch die Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural-Sealant-Glazing-Systems - SSGS) gegeben.²¹ Hierbei wird die Verglasung durch eine linienförmig ausgeführte Klebung an die Unterkonstruktion aus Aluminium oder Edelstahl angeschlossen. Als Klebstoff ist ausschließlich Silikon zugelassen, sowohl als ein- oder zweikomponentige Ausführung. Durch seine Eigenschaften, wie die sehr gute Haftung, die hohe Witterungsbeständigkeit, das ausgeglichene Verhalten bei Temperaturbeanspruchung und die Dauerhaftigkeit bei ultravioletter Strahlung als auch durch die relativ unkomplizierte Herstellung der Klebfugen hat sich Silikon in der Praxis bewährt.²² Um eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung zu erhalten, müssen die Silikone einem

¹⁹ Vergleiche hierzu Schadow 2006, Seite 26.

²⁰ Vergleiche hierzu TRLV 2006, Abschnitt 5.1.1. Für stoßartige und kurzfristige Belastungen wird eine Berücksichtigung des Schubverbundes bei Verwendung von PVB-Folien als Zwischenschicht künftig zugelassen, vergleiche hierzu DIN 18008-1, Abschnitt 7.2.2.

²¹ Vergleiche hierzu die Leitlinie ETAG 002-1. Diese Leitlinie ist nun als EN 13022-1 herausgegeben worden.

²² Vergleiche hierzu Doobe 2003, Seite 16 ff.

Nachweisverfahren entsprechend ETAG 002-1 unterworfen werden, das unterschiedliche Beanspruchungs- und Alterungsszenarien überprüft. Auch die Herstellung der Klebung im Werk unter kontrollierten Bedingungen ist gefordert, so dass die Fassade in Form vorgefertigter Elemente an den Einbauort geliefert werden muss. Nach den nationalen Regelungen sind in Deutschland solche Systeme nur dann zulässig, wenn das Eigengewicht der Verglasung nicht über die Klebung, sondern mechanisch über Klotzungen abgetragen wird. Weiterhin ist ab einer Einbauhöhe über 8 m eine zusätzliche mechanische Sicherung zur Verringerung der Gefährdung im Versagensfall der Klebung erforderlich.

Abweichende Ausführungen sind in Deutschland grundsätzlich nur über eine Zustimmung im Einzelfall der obersten Landesbauaufsichtsbehörde möglich.

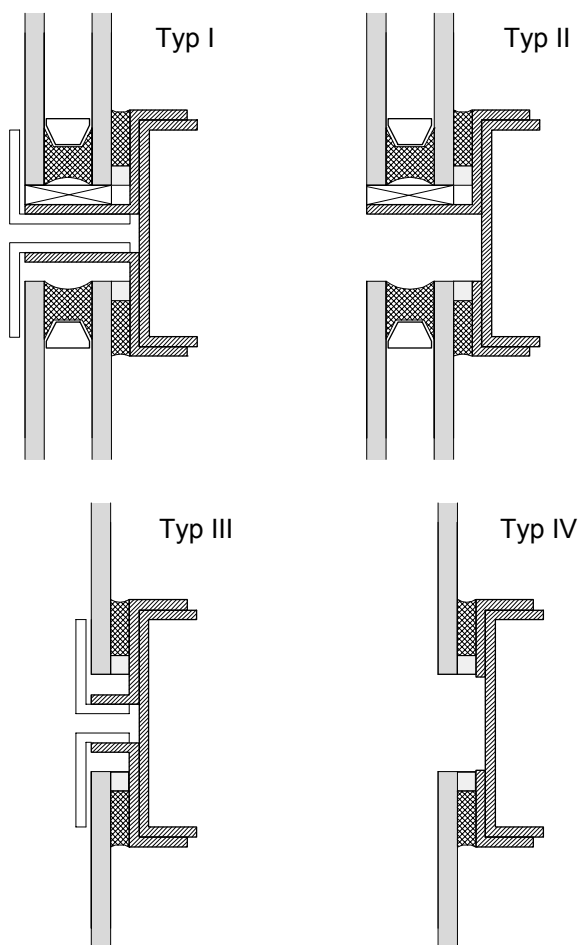


Bild 3 Ausführungsvarianten für SSGS-Verglasungen nach ETAG 002-1. Bei den gestützten Systemen, Typ I und II, wird das Eigengewicht der Scheibe auf den Tragrahmen übertragen. Die Silikonklebung leitet lediglich die Windlasten in die Unterkonstruktion ein. Beim Typ I ist zusätzlich eine Haltevorrichtung eingebaut, die das Herabfallen einer Glasscheibe im Ganzen verhindert. Die ungestützten Systeme, Typ III und IV, sind dadurch gekennzeichnet, dass die tragende Silikonklebung sowohl das Eigengewicht der Scheibe als auch die Windlasten aufnimmt. Dabei wird nur monolithisches Glas verwendet. Bei Typ III ist die Glasscheibe wiederum durch eine mechanische Sicherung gehalten. In Deutschland sind lediglich Typ I und II genehmigungsfähig.

Linienförmige Klebverbindungen können auch im Randverbund von Mehrscheiben-Isoliergläsern angewendet werden. Die Klebverbindung ist aus mehreren Schichten aufgebaut. Bei sachgerechter Ausführung verbindet sie die Gläser und gewährleistet eine dauerhafte Dichtheit gegen das Austreten von Gasen und das Eindringen von Feuchtigkeit. Als Primärdichtung zwischen den Gläsern und dem Randabstandhalter dient ein Butyldichtstoff. Im Randbereich wird Polysulfid oder Silikon als Sekundärdichtung eingesetzt.²³

Neben den vorab beschriebenen Anwendungen werden geklebte lastabtragende Konstruktionen im Konstruktiven Glasbau aufgrund der hohen Anforderungen der bauaufsichtlichen Behörden in Deutschland bislang nur selten verwirklicht. Dabei gibt es vielfältige Möglichkeiten, bei denen Glas punkt-, linien- oder flächenförmig an Glas oder Metall geklebt werden könnte.²⁴ Mit dem Erschließen neuer Anwendungsmöglichkeiten ist es gleichzeitig wichtig, Langzeiterfahrungen zu sammeln und Vertrauen in die neue Konstruktion zu entwickeln. Geeignet dafür erscheinen Konstruktionen, die bei einem eventuellen Versagen lediglich ein geringes Gefährdungspotenzial darstellen.

Möglichkeiten dafür bieten absturzsichernde Konstruktionen, die häufig mit Glaselementen ausgeführt werden.²⁵ Allerdings sind hier Einsatzort und Gefährdungspotenzial abzuwägen. Weiterhin sind auch in Überkopfverglasungen zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten zu sehen. Hierbei ist eine Gefährdung durch ein Versagen der Klebung und durch das Herabfallen der Glasscheiben zu vermeiden. Oft werden Konstruktionen verwendet, die eine Bohrung in der Glasscheibe erfordern. Stattdessen könnte das Glas über eine Klebung an die Unterkonstruktion verbunden werden.

Als weitere spezielle Anwendung sind Glaslamellen zu nennen, die auf vielfältige Art in Fassadenkonstruktionen integ-

²³ Vergleiche hierzu Geiß 2006, Seite 18. Bei Standsicherheits- und Durchbiegungsnachweisen darf eine günstig wirkende Schubkopplung über den Randverbund von Isoliergläsern nicht angesetzt werden. Vergleiche hierzu TRLV 2006, Abschnitt 5.1.2.

²⁴ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 12 ff.

²⁵ Absturzsichernden Verglasungen werden durch die TRAV 2006 geregelt. Weichen die Konstruktionen davon ab, muss eine Zustimmung im Einzelfall erfolgen.

riert oder auch im Innenbereich eingesetzt werden. Besonders zukunftsorientiert ist die Möglichkeit, bei Lamellen mit geklebten Halterungen die ungestörte Glasaußenfläche mit Photovoltaikelementen zu bestücken, um den neuen ökonomischen Anforderungen Rechnung zu tragen.

Bei den herkömmlich angewandten Konstruktionen ohne Klebung werden die Befestigungen meist punktförmig ausgeführt. Die Punkthalter erfordern ein Bohrloch in der Scheibe, welches noch vor dem Veredeln der Scheibe eingefügt werden muss. Ungeachtet der Kosten weisen Bohrungen in Glasscheiben zwei entscheidende Nachteile auf.

Verschiedene Materialien sind in der Verbindung erforderlich. Eine vorgefertigte und passgenaue Kunststoff- oder Aluminiumhülse²⁶ ist notwendig, um den direkten Kontakt zwischen Glas und Metall zu vermeiden, aber dennoch Lasten aus der Glasscheibe über den Bolzen in die Unterkonstruktion zu leiten. Bei einigen Konstruktionen, insbesondere Isolierglasscheiben kann ein Vergussmaterial²⁷ auf der Baustelle injiziert werden, das bei unsachgemäßer Handhabung den Zwischenraum jedoch nur unvollständig ausfüllt. Ein weiteres weiches Material, Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM), vermeidet den direkten Kontakt zwischen Tellerhalter und Glas. Dieses Zusammenspiel verschiedener Materialien erfordert eine große Erfahrung im Ansatz geeigneter Materialkennwerte für die Berechnung der Verbindung.

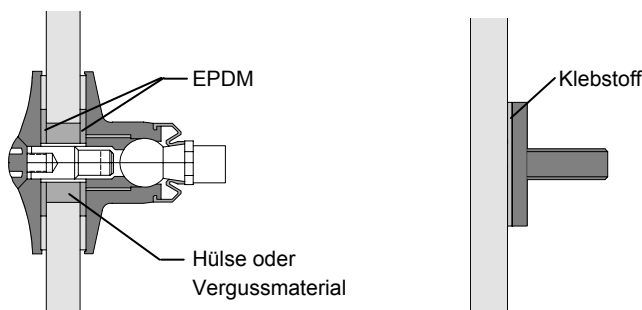


Bild 4 Gebohrte Halterung mit Gelenk (links), geklebter Punkthalter (rechts). Im Vergleich zu einem geklebten stellt der gebohrte Punkthalter eine gängige, aber aufwändige Konstruktion dar.

²⁶ Polyetheretherketon (PEEK), Polyoxymethylen (POM) oder Reinaluminium. Vergleiche hierzu Weller 2008, Seite 66.

²⁷ Zwei-Komponenten-Verbundmörtel, Klebstoff auf Epoxidharzbasis oder Glasmörtel. Vergleiche hierzu Weller 2008, Seite 66.

Sowohl durch Belastung senkrecht zur Scheibe als auch durch Belastung in Scheibenebene entstehen Spannungsspitzen im unmittelbaren Auflagerbereich der Glasscheibe. Um diese erhöhten lokalen Beanspruchungen aufzunehmen, sind dickere Glasscheiben erforderlich. Punktförmige Klebungen erzeugen zwar ebenfalls Spannungskonzentrationen in unmittelbarer Nähe der Klebung, sind aber aufgrund der durchgehenden Glasscheibe deutlich niedriger und ermöglichen geringere Glasdicken.

Erstrebenswert ist nicht nur ein vermehrter Einsatz geklebter Verbindungen, sondern gleichzeitig auch ein ansprechendes Erscheinungsbild, um die Leichtigkeit gläserner Strukturen hervorzuheben. Durch ihr transparentes und farbloses Erscheinungsbild empfehlen sich dafür besonders UV- und lichthärtende Acrylatklebstoffe.

Neben den Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wird in weiteren Projekten die Verwendbarkeit von strahlungshärtenden Acrylate an unterschiedlichen Bauteilen aus Glas begutachtet und an Hand von Demonstratoren dargestellt.²⁸

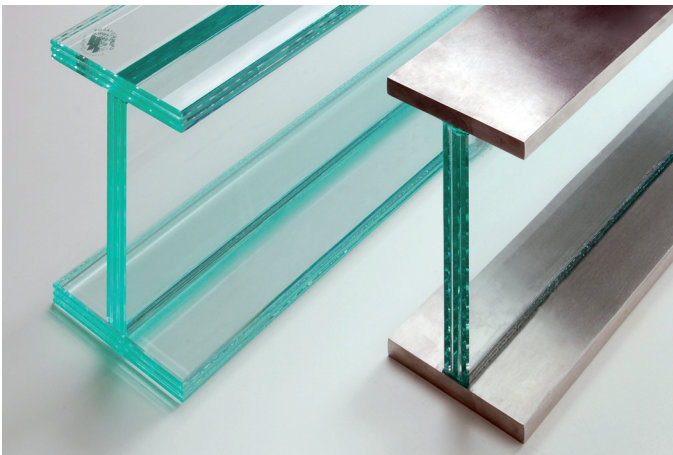


Bild 5 Geklebte Glasträger. Die Flansche aus Glas beziehungsweise aus Edelstahl werden über linienförmige Klebungen mit den Stegen verbunden. Hierfür wurde der Acrylatklebstoff Photobond GB485 verwendet, der eine transparente Verbindung ergibt.

²⁸ Vergleiche hierzu Behling 2008, Seite 79 und Weller 2008, Seite 70 f.

4 Versuchswerkstoffe

4.1 UV- und lichthärtende Acrylatklebstoffe

Die UV- und lichthärtenden Acrylate, die in dieser Arbeit untersucht werden, gehören zu der Gruppe der chemisch reagierenden Klebstoffe. Im Gegensatz zu den physikalisch abbindenden Klebstoffen²⁹ verläuft die Polymerbildung durch eine chemische Reaktion.

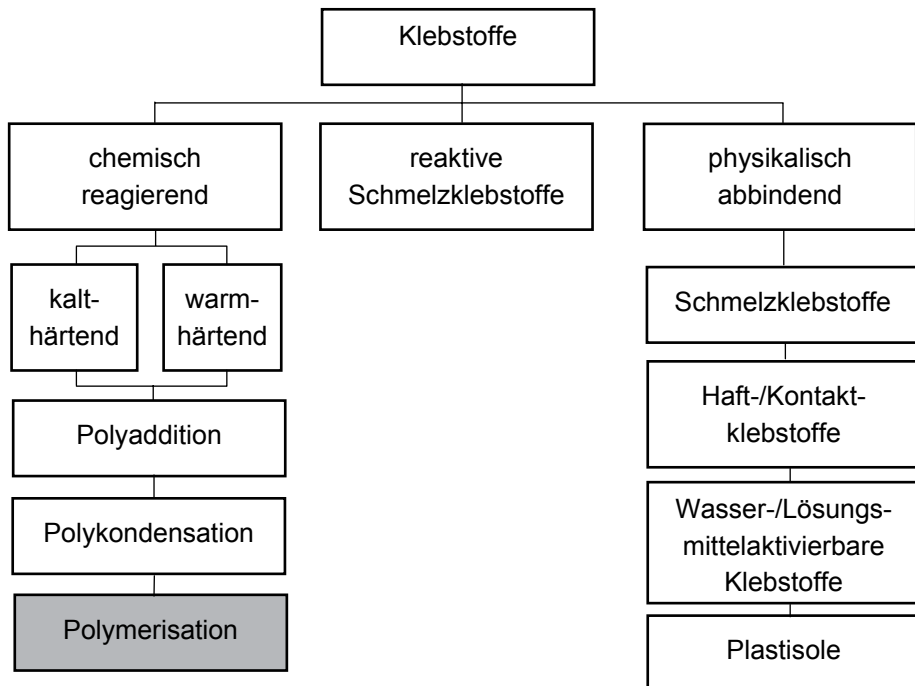


Bild 6 Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Abbindevorgang. Die Acrylatklebstoffe, die in dieser Arbeit untersucht werden, zählen zu den kalthärtenden Polymerisationsklebstoffen.

²⁹ Physikalisch abbindende Systeme bestehen aus Polymeren, die sich schon im Endzustand befinden. Die Härtung erfolgt durch Erwärmung mit anschließender Abkühlung (Schmelzklebstoffe), durch Anwendung von Druck (Haft- oder Kontaktklebstoffe), durch Abgabe von Wasser oder Lösungsmitteln, in dem das Polymer gelöst war, oder durch Sol-Gel-Prozesse (Plastisole). Reaktive Schmelzklebstoffe stellen eine Kombination beider Abbinde-mechanismen dar. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 5 f. und Jansen 2004a, Seite 94 f.

Die chemisch reagierenden Klebstoffe unterteilen sich nach der Verarbeitungstemperatur und dem ablaufenden Reaktionsmechanismus.³⁰ Zusätzlich wird nach Anzahl der Komponenten in Ein- und Zweikomponentensysteme unterschieden. Die Acrylate gehören zu der Gruppe der einkomponentigen und kalthärtenden Polymerisationsklebstoffe.

Die Polymerisation gliedert sich in weitere Untergruppen, die sich nach der Reaktion unterscheiden.³¹ Strahlungshärtende Acrylatklebstoffe vernetzen mittels einer radikalischen Polymerisation. Charakteristisch dafür sind die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen im Molekül. Folgend wird vereinfacht der Aushärtemechanismus dargestellt. Der lighthärtende Klebstoff enthält Photoinitiatoren (I-I), die bei Belichtung in freie Radikale (I•) zerfallen und die Aushärtereaktion einleiten. Die freien Radikale brechen die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen auf und bilden mit ihnen Monomerradikale. Das Kettenwachstum setzt sich fort, es werden radikale Kettenmoleküle gebildet. Dieser Vorgang läuft so lange, bis alle Monomere verbraucht sind oder bis die Reaktion abgebrochen wird.³²

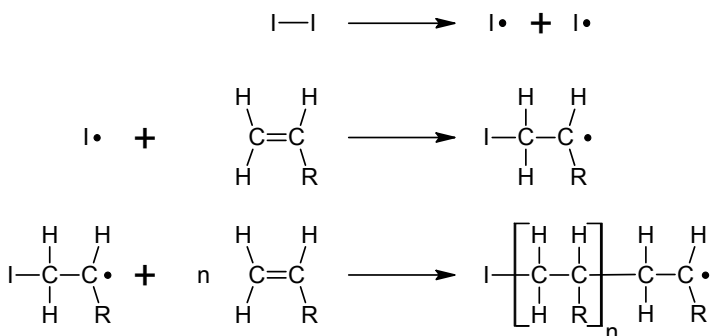


Bild 7 Reaktionsschema der radikalischen Polymerisation eines strahlungshärtenden Acrylatklebstoffes.

C Kohlenstoff
H Wasserstoff
I• freie Radikale
I Initiator
R Rest

³⁰ Bei Polyadditionsklebstoffen beruht die Aushärtung auf der Wanderung eines Wasserstoffatoms von einer Komponente zur anderen. Zu dieser Gruppe gehören die Epoxidharz- und die Polyurethanklebstoffe. Merkmal der Polykondensation ist die Abspaltung eines einfachen Moleküls wie Wasser oder Alkohol. Die im Bauwesen häufig verwendeten Silikone sind typische Vertreter dieser Gruppe. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 73 f.

³¹ Neben der radikalischen Polymerisation wird in eine kationische, anionische und koordinative Polymerisation unterschieden. Vergleiche hierzu Lechner 2003, Seite 50. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter erläutert.

³² Vergleiche hierzu Weigel 2007, Seite 18 ff. und Witek 2004, Seite 97 f.

Ein vorzeitiges Reaktionsende resultiert entweder durch Rekombination der gebildeten Radikale bei einem verfrühten Abbruch der Bestrahlung oder durch Sauerstoffinhibierung. Sauerstoff reagiert mit den freien Radikalen und bildet recht stabile, reaktionsträge Radikale.³³ Dadurch wird die Bildung von Polymerketten gestoppt. Die Aushärtung wird angehalten und führt zu einer bleibenden Oberflächenklebrigkeit. Dies kann durch eine Herstellung unter Schutzgasatmosphäre verhindert werden.³⁴

Um den Aushärtevorgang zu starten, sind energiereiche Strahlungen innerhalb eines speziellen Wellenlängenbereiches erforderlich. Der Bereich von 320 bis 450 nm, der zur Aushärtung der untersuchten Acrylate erforderlich ist, wird durch UVA Strahlung (315 bis 380 nm) und sichtbares Licht (380 bis 780 nm) abgedeckt. Bei Verwendung von UV-Strahlung können Schichtdicken bis 1 mm gehärtet werden.³⁵ Werden dickere Klebfugen ausgeführt, ist sichtbares Licht erforderlich. UV-Strahlung wird oberflächennah sehr stark absorbiert, nur langwellige Strahlung kann tiefere Schichten erreichen. Bei Aushärtung mit sichtbarem Licht sind Fugendicken von mehreren Millimetern möglich. Einige Anwendungen, wie zum Beispiel Überkopfverglasungen, erfordern ebenfalls eine Aushärtung mit sichtbarem Licht. Die PVB-Folie des hier einzusetzenden Verbund-Sicherheitsglases lässt keine UV-Strahlung durch.

Eine schnelle Aushärtung bei einer guten Vernetzungsqualität kann durch den Einsatz einer geeigneten Lampe erzielt werden. Es ist darauf zu achten, dass die Lampe im erforderlichen Wellenlängenbereich eine große Intensität aufweist. Neben Flächenstrahlern eignen sich LED-Module oder Punktstrahler.³⁶

³³ Vergleiche hierzu Elias 1999, Seite 311.

³⁴ Beispielsweise kann die Herstellung der Klebung in einem Glove Bag erfolgen, der mit Stickstoff gefüllt ist. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 33.

³⁵ Vergleiche hierzu Witek 2004, Seite 98 f.

³⁶ Vergleiche hierzu Weigel 2007, Seite 35 und Seite 138. LED-Lampen sind Halbleiterdioden, die beim Anlegen einer Spannung Licht in einem definierten Wellenlängenbereich aussenden. Punktstrahler sind Lichtleiterlampen. Mit ihnen können zurzeit die höchsten punktuellen Lichtstärken erreicht werden.



Bild 8 Flächenstrahler DELOLUX 03 zur Aushärtung geklebter Prüfkörper. Der Prüfkörper, hier der Zylinderprüfkörper aus Kapitel 9.2.1, wird unter die Lampe geschoben und innerhalb von Sekunden ausgehärtet.

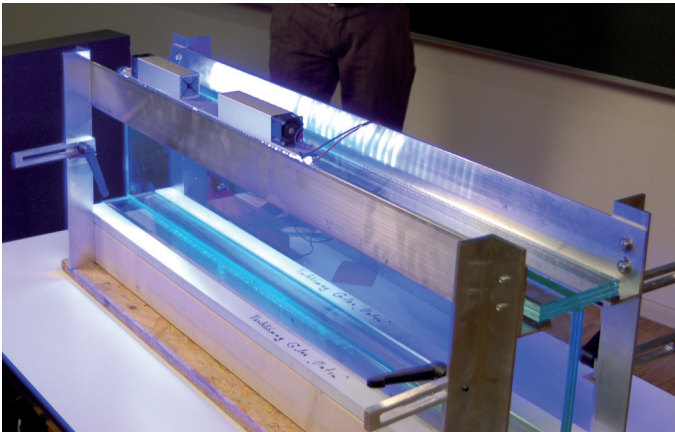


Bild 9 Zwei LED-Module zur Aushärtung eines geklebten Glasträgers. Sie werden abschnittsweise versetzt, bis die Klebfuge über die gesamte Länge ausgehärtet ist.

Für diese Arbeit werden aus dem breiten Spektrum der UV- und lichterhärtenden Acrylatklebstoffe zwei typische Vertreter herausgesucht. Der Photobond 4468 ist ein etablierter Klebstoff für Glasverbindungen. Empfohlen wird er für punktförmige Verklebungen, zum Beispiel von Glastrennwänden und Duschtüren aus Glas.³⁷ Der Photobond GB485 wird ebenfalls für Glasklebung verwendet. Durch seine Viskosität fließt er nicht, sondern bleibt nach dem Klebstoffauftrag in Form einer Raupe. Diese Eigenschaft zeichnet ihn für Anwendungen mit linienförmigen Klebfugen aus.³⁸

³⁷ Vergleiche hierzu DELO 2006.

³⁸ Mit dem Photobond VE 55727, dem Photobond VE 55779 und dem Photobond VE 56422 wurden drei weitere UV- und lichterhärtende Acrylatklebstoffe auf ihre Alterungsbeständigkeit untersucht. Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 78.

Klebstoff ³⁹	Photobond 4468	Photobond GB485
Chemische Basis	Modifiziertes Acrylat	Modifiziertes Urethanacrylat
Wellenlängenbereich [nm]	320 - 450	320 - 420
Farbe ⁴⁰	farblos klar	farblos klar
Viskosität [mPas]	7000	65000
Aushärtezeit ⁴¹ [s]	40	18
Schrumpf [%]	9	7
Empfohlener Dauertemperaturbereich [°C]	-40 bis +120	-40 bis +120

Tafel 1 Eigenschaften der untersuchten Acrylatklebstoffe Photobond 4468 und Photobond GB485.

Zur Beschreibung eines Klebstoffes wird häufig die Topfzeit angegeben. Diese bezeichnet den Zeitraum, innerhalb dem das Material verarbeitbar ist. Bei den strahlungshärtenden Klebstoffen kann dazu jedoch keine definierte Angabe erfolgen. Da diese Klebstoffe auch unter normalem Licht aushärten, hängt die Verarbeitbarkeit von den Lichtverhältnissen im Herstellungsraum ab. Bei abgedunkelten Verhältnissen findet nahezu keine Vernetzung statt. Der Klebstoff bleibt über einen langen Zeitraum flüssig. Dennoch müssen die Prozesse so ausgelegt werden, dass die Aushärtung möglichst bald nach Klebstoffauftrag erfolgt. Flüssiger Klebstoff kann bei längerer Einwirkung die Oberfläche angreifen. Leicht flüchtige Substanzen gasen aus und erzeugen einen unangenehmen Geruch.

Um die Haftung des Klebstoffes auf dem Fügeteil zu verbessern und die Alterungsvorgänge in der Klebfuge zu verzögern, werden Haftvermittler eingesetzt. Diese sogenannten Primer sind in den verwendeten Acrylatklebstoffen bereits enthalten. Ein zusätzlicher Arbeitsschritt bleibt somit erspart.

Acrylatklebstoffe zeigen mit einem Schrumpf in Größenordnungen von 5 bis 10 % ein ausgeprägtes Reaktionsschwindungsverhalten.⁴² Besonders bei Klebfugen mit größeren

³⁹ Alle Angaben stammen aus den Datenblättern des Herstellers. Vergleiche hierzu Delo 4468 und Delo 485.

⁴⁰ Ausgehärtet in etwa 0,1 mm Schichtdicke.

⁴¹ UVA-Intensität 60 mW/cm².

⁴² Bei Epoxidharzen beträgt der Schwund 4 bis 5 %, bei Polyurethanen 3 bis 5 %, bei Silikon weniger als 1 %. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 369.

Abmessungen ist dies in der Herstellung zu beachten. Hier erweist es sich oft als sinnvoll, eine stufenweise Aushärtung vorzunehmen, um die inneren Spannungen zu reduzieren. Dazu wird mit einer geringeren Intensität vorgehärtet und folgend mit einer höheren Intensität ausgehärtet.⁴³

Bei UV- und lichterhärtenden Acrylatklebstoffen, die ihre Polymere auf Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindungen aufbauen, muss die Beständigkeit gegenüber einer photochemischen Alterung nachgewiesen werden. Bei Wellenlängen von 290 nm können diese Bindungen gespalten werden, mit der Folge einer Versprödung des Materials. Dieser Effekt wird durch Alterungstests ausgeschlossen.⁴⁴

Die Viskosität beschreibt die Zähflüssigkeit des Materials. Je niedrigviskoser der Stoff, umso dünnflüssiger ist er. Je höher der Wert, umso dickflüssiger und standfester ist der Klebstoff.⁴⁵ Die Viskosität bildet ein wichtiges Kriterium für die Klebstoffauswahl.

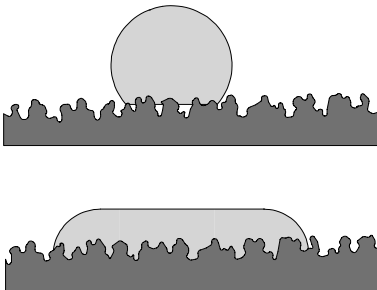


Bild 10 Hochviskoser Klebstoff (oben) und niedrigviskoser Klebstoff (unten). Hochviskose Klebstoffe sollten dennoch selbst unebene Fügeteiloberflächen vollständig benetzen.

Bei geringen Fügespalten kann ein dünnflüssiger Klebstoff mit einem kapillaren Fließverhalten vorteilhaft sein. Zur Überbrückung von großen Spalten ist ein eher hochviskoses Material erforderlich. Bei Anwendungsfällen mit langgezogenen linienförmigen Klebfugen ist eine gewisse Standfestigkeit gewünscht, damit der Klebstoff bis zum Auflegen des

⁴³ Hierzu sollen weitere Untersuchungen folgen, um in Abhängigkeit der Klebfugengeometrie definierte Empfehlungen geben zu können.

⁴⁴ Vergleiche hierzu Franck 1984, Seite 235 ff. und Lechner 2003, Seite 479 ff. Die Versuche zum Nachweis der UV-Stabilität basieren auf der ETAG 002-1 und sind in Tasche 2007, Seite 84 f. erläutert. Die Lichtechtheit wird in Witek 2004, Seite 103 beschrieben.

⁴⁵ Vergleiche Weigel 2007, Seite 32. Beispielhaft sind einige Viskositätswerte genannt: flüssiger Honig 10000 mPas; Olivenöl 100 mPas; Wasser 1 mPas.

Fügeteils in Form einer Raupe verbleibt, ohne auseinander zu fließen.

In einigen Fällen kann die Viskosität durch den Einsatz von Thixotropiermitteln gezielt beeinflusst werden. Dadurch kann der Klebstoff thixotrop eingestellt werden, wodurch er unter mechanischer Einwirkung, zum Beispiel Schütteln oder Rühren, vorübergehend flüssiger wird und somit in einen Zustand niedriger Viskosität übergeht.⁴⁶ Die Thixotropie ist vor allem während der Dosierung hilfreich, um durch eine erniedrigte Viskosität eine bessere Verarbeitung zu ermöglichen. Im Idealfall zieht die Viskosität nach dem Klebstoffauftrag wieder an, um den Klebstoff in der Form zu halten.

Bringt man einen Tropfen Klebstoff auf eine feste Oberfläche, dann kann er verschiedene Formen annehmen.⁴⁷ Diese Benetzungsverhältnisse sind abhängig von der Viskosität des Klebstoffes und der Oberflächenspannung des Fügeteils. Beschrieben wird dieses Verhalten durch den Benetzungswinkel α , den die an der Flüssigkeitsoberfläche geneigte Tangente mit der Fügeteiloberfläche bildet.⁴⁸

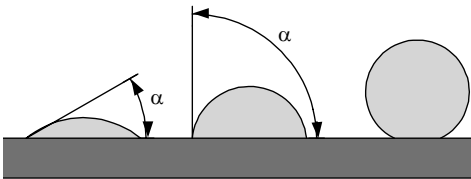


Bild 11 Benetzungswinkel α . Die Darstellungen zeigen ansteigende Winkel bis zu einer fast nicht vorhandenen Benetzung rechts.

Optimale Benetzungsverhältnisse liegen vor, wenn der Benetzungswinkel α geringer als 30° ist. Dies lässt sich durch Oberflächenvorbehandlungen, insbesondere Reinigen und Entfetten, und durch entsprechende Viskositätseinstellungen der Klebstoffe erreichen.

⁴⁶ Vergleiche Habenicht 2006, Seite 562.

⁴⁷ Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 336 ff.

⁴⁸ Benetzungswinkel ausgewählter Gläser sind in Tasche 2007, Seite 47 aufgeführt.

4.2 Fügeteile

4.2.1 Glas

Der Baustoff Glas ist ein anorganisches, nichtmetallisches Material. Die Rohmaterialien werden hohen Temperaturen ausgesetzt, bis eine homogene Flüssigkeit entsteht. Diese wird bis zum festen Zustand abgekühlt, in der Regel ohne Kristallisation.⁴⁹

Neben Borosilicatglas wird im Bauwesen hauptsächlich Kalk-Natronsilicatglas eingesetzt.⁵⁰ Beide kennzeichnet ein linear-elastisches Verhalten bis zum Versagen durch Sprödbbruch. Spannungsspitzen können nicht plastisch abgebaut werden. Der direkte Kontakt zwischen Glas und harten Materialien ist deshalb durch geeignete Zwischenschichten zu vermeiden.

Das bautechnisch verwendete Glas wird üblicherweise im Floatverfahren hergestellt. Die flüssige Glasschmelze mit Temperaturen von etwa 1000 °C wird auf ein Zinnbad gegossen. Dadurch gewinnt es seine absolut ebene und gleichmäßige Dicke. Beim Aushärten der Schmelze dringt Zinn in die auf dem Zinnbad liegende Oberfläche ein, der so genannten Badseite. Die Oberfläche, die zur Luftseite aushärtet, bleibt unverändert und wird als Atmosphärenseite bezeichnet.

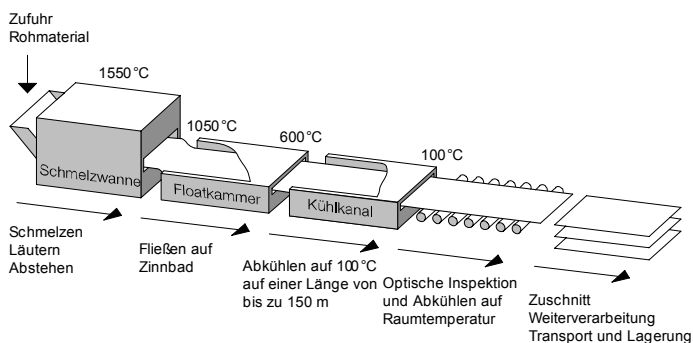


Bild 12 Prinzipskizze des Floatglasprozesses. Das flüssige Glas fließt auf einem Zinnbad. Von dort wird es in den Kühlkanal weitergeleitet. Nach dem Abkühlen beginnt die Weiterverarbeitung.

⁴⁹ Vergleiche hierzu DIN1259-1, Seite 8.

⁵⁰ Die Glasarten unterscheiden sich durch ihre Zusammensetzung und die daraus resultierenden Eigenschaften. Borosilicatglas unterscheidet sich von Kalk-Natronsilicatglas hauptsächlich durch eine geringere Dichte und eine höhere Temperaturwechselbeständigkeit. Im Bauwesen findet es als Brandschutzverglasung Anwendung. Vergleiche hierzu EN 572-1 und EN 1748-1-1.

Aufgrund dieses Herstellungsprozesses unterscheiden sich Bad- und Atmosphärenseite. Das eindiffundierende Zinn beeinflusst die Oberflächenrauigkeit. Die Badseite zeigt deutlich geringere Rauigkeiten als die Atmosphärenseite des Floatglases. Untersuchungen hierzu zeigten Unterschiede in den Festigkeiten geklebter Verbindungen. Wurde die Badseite geklebt, ergaben sich sowohl vor als auch nach Alterung geringere Festigkeitswerte als bei Klebungen mit der Atmosphärenseite.⁵¹

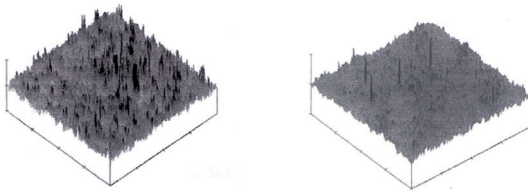


Bild 13 Oberflächenrauigkeit der Atmosphärenseite (links) und der Badseite (rechts), ermittelt mit der Rasterkraftmikroskopie.

Auf diese Betrachtung aufbauend werden alle weiteren Glasproben mit der Atmosphärenseite geklebt. Zum Nachweisen der beiden Seiten des Glases dient eine spezielle UV-Lampe, die das eindiffundierte Zinn nachweist.⁵²

Glas besitzt eine für den Werkstoff typische Oberflächenschicht, die sogenannte Gelschicht. Sie bildet die Sperre zwischen dem Glasgefüge und dem Klebstoff, welche die Adhäsion nachhaltig beeinflusst. Da sie durch Luftfeuchtigkeit aufgebaut wird, ist eine anhaltende Entfernung dieser Sperre technisch nur schwer durchführbar. Kurzfristig stellt eine Reinigung mit wasserfreien Alkoholen oder Aceton unmittelbar vor dem Kleben eine Möglichkeit dar, diese Schicht kurzfristig zu entfernen und somit die Adhäsion zu verbessern. Zusätzlich kann die Klebfläche vor dem Kleben mit warmer Luft getrocknet werden. Bei Einsatz von Haftvermittlern werden widerstandsfähige chemische Verbindungen hergestellt, die die Alterungsbeständigkeit verbessern.⁵³

Floatglas ist durch seine Durchstrahlbarkeit zum Kleben mit UV- und lichterhärtenden Acrylaten geeignet. Die Durchlässigkeit von Strahlungen ist sowohl von der Dicke des Glases

⁵¹ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 103 f.

⁵² Vergleiche hierzu Kapitel 8.2.

⁵³ Vergleiche hierzu Peters 2006, Seite 72 f. und Tasche 2007, Seite 48.

als auch im besonderen Maße von der Wellenlänge abhängig. Unterhalb von 300 nm und oberhalb von 2800 nm wird keine Energie eingestrahlt. Im Bereich des sichtbaren Lichtes (380 bis 780 nm) erreicht die Transmission ihr Maximum mit etwa 90 %. Langwellige UV-Strahlung (UVA-Strahlung mit Wellenlängen von 315 bis 380 nm) kann ebenfalls durch das Glas durchdringen und somit zur Aushärtung des Klebstoffs verwendet werden.⁵⁴

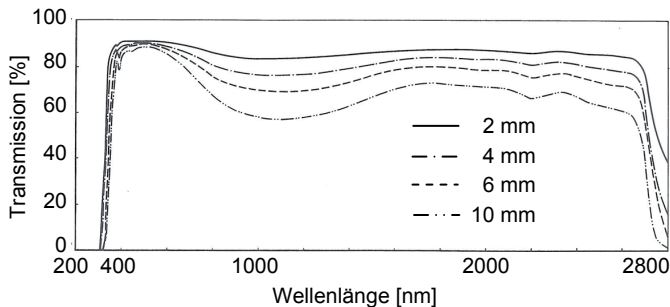


Bild 14 Spektrale Durchlässigkeit von Floatglas in verschiedenen Dicken. Die untersuchten Acrylate härten in einem Strahlungsbe-
reich von 320 bis 450 nm
aus, in dem Floatglas eine
ausreichende Durchlässigkeit
besitzt.

Weiterhin wird die Transmission von dem Winkel, unter dem die Strahlung auf die Glasscheibe auftrifft, beeinflusst. Ab einem Winkel von etwa 50° beginnt die Lichtdurchlässigkeit abzunehmen. Werden die Winkel größer, sinkt die Transmission rapide bis auf 0 % ab.⁵⁵

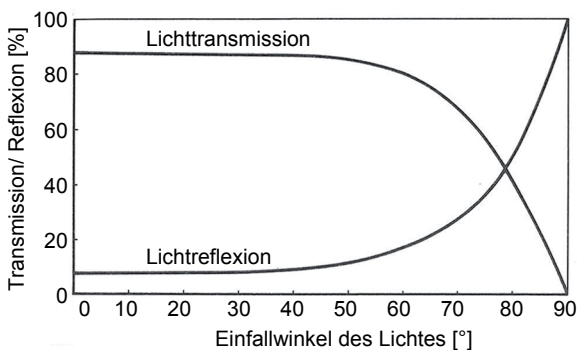


Bild 15 Lichttransmission und Reflexion in Abhängigkeit vom Einfallswinkel des Lichtes für 5 mm Floatglas.

Für die praktische Umsetzung bedeutet dies, dass die Strahlungsquelle so positioniert werden muss, dass die maximale Lichtmenge durch das Glas dringt. Die Strahlung soll nahezu senkrecht auf die Glasoberfläche treffen, um eine schnelle Aushärtung zu erreichen.

⁵⁴ Vergleiche hierzu Petzold 1990, Seite 55 f.

⁵⁵ Vergleiche hierzu Petzold 1990, Seite 57 f.

Gleichzeitig ist darauf zu achten, dass die Strahlung senkrecht auf die Klebfläche fällt. Bei seitlicher Strahlung ist die auszuhärtende Tiefe größer. Da die oberflächennahen Schichten die UV-Strahlung stark absorbieren, kann eine vollständige Aushärtung verhindert werden.⁵⁶

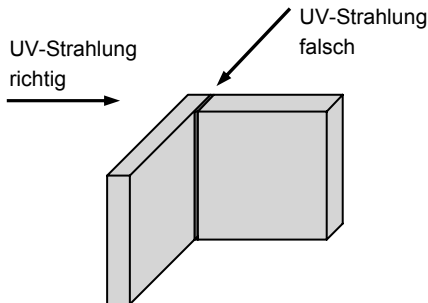


Bild 16 Richtige und falsche Stellung der Lampe. Zur vollständigen Aushärtung muss die Strahlung senkrecht durch das Glas und senkrecht auf die Klebfläche fallen.

4.2.2 Metall

Für Klebungen im Konstruktiven Glasbau können unterschiedliche Metalle eingesetzt werden. Im Außenbereich werden hauptsächlich Edelstahl und Aluminium verwendet. Beide Metalle weisen eine gute Korrosionsbeständigkeit auf. Für Anwendungen im Innenbereich wird häufig Messing in unterschiedlichen Oberflächenqualitäten eingesetzt. Durch Aufbringen einer Beschichtung entstehen matt- oder glanzverchromte Oberflächen. Farbliche Akzente können durch Pulverbeschichtungen gesetzt werden.⁵⁷

Diese Arbeit konzentriert sich auf Halterungen aus Edelstahl, die für die untersuchten Bauteilanwendungen mit punktförmigen Halterungen in Betracht kommen. In Anlehnung an ausgeführte Beispiele werden die Edelstahloberflächen entsprechend ihrem Einsatzbereich weiterbearbeitet.

Die Prüfkörper, die für die Zugprüfungen verwendet werden, werden auf der Drehmaschine bearbeitet. Es entsteht somit eine gedrehte Oberfläche, die für punktförmige Halterungen denkbar ist.

⁵⁶ Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 715.

⁵⁷ Untersuchungen an glanzverchromtem, mattverchromtem und pulverbeschichtetem Messing, an eloxiertem Aluminium sowie an gedrehtem, poliertem und geschliffenem Edelstahl werden in Tasche 2007, Seite 52 ff. durchgeführt.

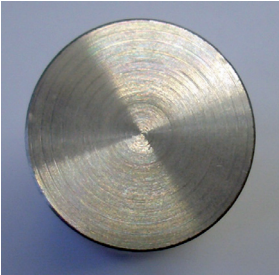


Bild 17 Oberfläche des Zylinderzugprüfkörpers aus Edelstahl. Der Prüfkörper wurde an der Drehmaschine bearbeitet. Im Erscheinungsbild kann er einem Punkthalter entsprechen.

Bei linienförmigen oder flächigen Bauteilen findet man häufig geschliffene Oberflächen. Dieses Erscheinungsbild wird erzeugt, indem die Metallkörper mit einer Fräse bearbeitet werden. Alternativ stand bei den kleinteiligen Druckscherprüfkörpern auch eine gedrehte Variante zu Verfügung. Obwohl vorangegangene Untersuchungen bei geschliffenen Druckscherprüfkörpern geringfügig niedrigere aufnehmbare Kräfte zeigten als bei der gedrehten Ausführung⁵⁸, wurde die Entscheidung zugunsten der geschliffenen Oberfläche gefällt. Bei ihnen wurde über die Fläche gesehen eine gleichmäßigere Dicke der Fügeteile gewährleistet. Fügeteile mit gedrehter Ausführung wiesen eher konkave Oberflächen auf, die die Herstellung einer konstanten Klebfugendicke verhindern.

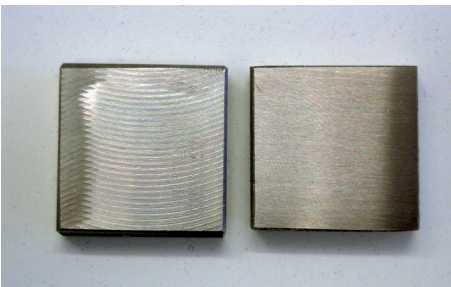


Bild 18 Oberfläche der Druckscherprüfkörper in gedrehter (links) und geschliffenen (rechts) Ausführung.

⁵⁸ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 138 f.

5 Methoden zur Kennwertermittlung

5.1 Kennwertermittlung an Substanzprüfkörpern

Um Klebverbindungen planen und deren Einsatz verwirklichen zu können, ist es notwendig, das Verhalten der Klebstoffe unter Belastung zu kennen. Das Beschreiben des Materials durch umfassende Kennwerte ist Grundlage für wirklichkeitsnahe Ergebnisse bei Berechnungen von geklebten Konstruktionen. Zur Ermittlung der Kennwerte haben sich zwei experimentelle Möglichkeiten bewährt: Untersuchungen an Substanzprüfkörpern und an in-situ-Prüfkörpern.

Substanzprüfkörper werden lediglich aus dem Klebstoffmaterial hergestellt. An ihnen können materialspezifische Kennwerte, wie Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl, ermittelt werden. Neben der einfachen Herstellung und Handhabung liegt der Vorteil dieser Prüfkörper in der unbehinderten Verformbarkeit der Probe in beiden Querrichtungen. In ausreichender Entfernung der Prüfkörpereinspannung entsteht ein einaxialer Spannungszustand mit homogen über den Querschnitt verteilten Spannungen und Dehnungen. Die Materialkennwerte können ohne Einfluss einer behinderten Querdehnung durch steifere Fügeteile und ohne die Auswirkungen veränderter Materialeigenschaften im Bereich der Grenzschicht⁵⁹ - wie bei den in-situ-Prüfkörpern - ermittelt werden.

Die Substanzprüfkörper werden meist in Form von Schulterstäben für die Untersuchungen eingesetzt. Die an den Enden breiter ausgebildeten Schultern ermöglichen ein festes Einklemmen in die Prüfmaschine. Durch die Verjüngung des Übergangsbereichs werden die aufgebrachten Kräfte konzentriert in den schmalen Mittelteil eingeleitet und erzeugen ein einheitliches Spannungsbild.

In Abhängigkeit der zu untersuchenden Materialien und dem Herstellungsprozess werden verschiedene Typen von Prüfkörpern empfohlen.⁶⁰ Die Standardform ist der Typ 1 nach

⁵⁹ Vergleiche hierzu Kapitel 6 dieser Arbeit.

⁶⁰ Vergleiche hierzu ISO 293, ISO 294, ISO 527-2, ISO 527-3, ISO 3167 sowie ETAG 002-1. In Grellmann 2005, S. 20 ff. wird ausführlich auf die Unterschiede des Formgebungsverfahrens und der mit der Molekül-

ISO 527-2 beziehungsweise ISO 3167. Die Ausbildung des Übergangsbereiches und der Schultern - meist durch den Herstellungsprozess bedingt - unterscheidet in die Typen 1A und 1B. Der Messbereich bei beiden ist analog.⁶¹ Werden hohe Verformungen erwartet, welche die Möglichkeiten der Prüfmaschine oder die Abmessungen der dazugehörigen Klimakammer überschreiten, kann der kleinere Prüfkörper Typ 5 nach ISO 527-2 herangezogen werden. Jedoch können durch die geringere Messlänge und die kürzere Versuchsdauer die gemessenen Werte mit Ungenauigkeiten behaftet sein. Die Ergebnisse der kleinen Prüfkörpertypen sind nur bedingt mit denen der Standardtypen vergleichbar.

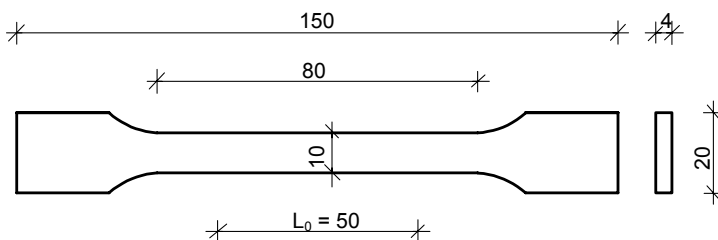


Bild 19 Prüfkörper Typ 1A nach ISO 527-2. Er entspricht dem Vielzweckprüfkörper nach ISO 3167. Mit L_0 wird die Messlänge bezeichnet.

Maße in [mm]

ISO 527-1 beschreibt die Verfahrensweise, Zugeigenschaften von Kunststoffen an Substanzprüfkörpern zu ermitteln. Diese werden entlang ihrer größten Hauptachse bei konstanter Geschwindigkeit gedehnt, bis ein Versagen auftritt oder bis die Spannung oder Dehnung einen vorgegebenen Wert aufweist. Währenddessen werden die Belastung und die Verformung dokumentiert.

Grundsätzlich ist bei der Versuchsdurchführung zwischen Versuchen zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls und Messungen der Trag- und Verformungseigenschaften zu unterscheiden. Gemäß der Norm sollten diese Versuche getrennt und an jeweils verschiedenen Probekörpern durchgeführt werden.

struktur zusammenhängenden Eigenschaften (Thermoplast, Duromer, Elastomer) bei der Wahl der Prüfkörper eingegangen.

⁶¹ Der Typ 1A wird als Vielzweckprüfkörper bezeichnet, da er sowohl für den Zugversuch als auch für Biege-, Druck- und Schlagversuche eingesetzt werden kann. Für diese Versuche kann das schmale parallele Mittelstück oder Teilstücke davon durch Kürzen verwendet werden. Im Kapitel 7 wird der Prüfkörper Typ 1B für ein erweitertes Versuchsprogramm verwendet.



Bild 20 Substanzprüfkörper in zwei Größen und den in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffen, rechts Typ 5A aus Photobond GB485 (vormals 55789), links Typ 1B aus Photobond 4468. Letztere werden für ausführliche Untersuchungen zum geschwindigkeits- und temperaturabhängigen Verhalten der Acrylate verwendet.

Bei Versuchsdurchführungen zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls ist eine Prüfgeschwindigkeit zu wählen, die eine Dehnung nahe 1 % der Messlänge pro Minute ergibt. Für den Standardprüfkörper Typ 1 schreibt ISO 527-2 eine Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min vor.⁶² Der Elastizitätsmodul wird als Sekantenmodul im Anfangsbereich der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung nach dem HOOKE'schen Gesetz ermittelt. Dabei wird der niedrigere Dehnungswert größer als Null gesetzt, um Verfälschungen durch auftretende Anfahreffekte zu vermeiden.

Der Elastizitätsmodul für den Klebstoff ergibt sich zu

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}$$

Gleichung 1

mit

- σ_1 Spannung, gemessen bei einer Dehnung von $\varepsilon_1 = 0,05 \%$.
- σ_2 Spannung, gemessen bei einer Dehnung von $\varepsilon_2 = 0,25 \%$.

⁶² Silikone sind nach ETAG 002-1 für die Ermittlung des Elastizitätsmoduls mit einer Geschwindigkeit von 5 mm/min zu untersuchen. Hierzu werden Probekörper des Typs 5A nach EN 527-3 verwendet.

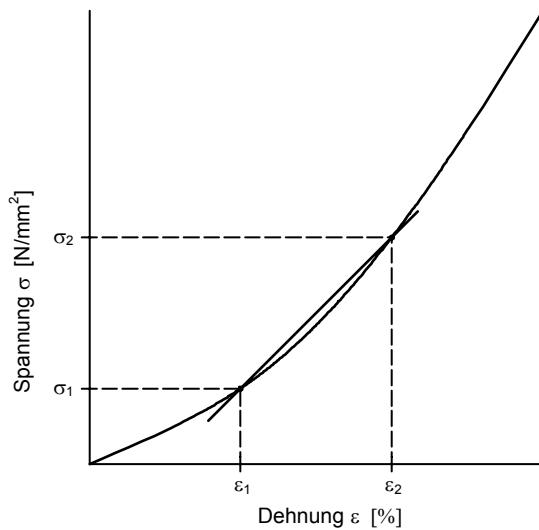


Bild 21 Schematische Darstellung der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls. Er wird als Sekantenmodul aus den Werten bei Dehnungen von 0,05 % und 0,25 % ermittelt.

Zur Ermittlung der Trag- und Verformungseigenschaften wie Zugfestigkeit und Bruchdehnung ist nach ISO 527-1 eine Prüfgeschwindigkeit aus einem breiten Spektrum von 1 bis 500 mm/min zu wählen.⁶³ Eine Konkretisierung trifft ISO 10350. Spröde Kunststoffe mit einer Bruchdehnung von weniger als 10 % sollen mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min untersucht werden. Versuche an Kunststoffen, die eine Bruchdehnung von mehr als 10 % aufweisen, sind mit einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min durchzuführen.

Aufgrund der verschiedenen Prüfgeschwindigkeiten sind diese Versuche mit ihren unterschiedlichen Zielen normgerecht an separaten Prüfkörpern durchzuführen. In der Praxis verwendet man jedoch oft denselben Prüfkörper, der innerhalb eines Versuchsdurchganges mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten gezogen wird. Zu Beginn wird mit der geringeren Geschwindigkeit zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls geprüft. Diesem Bereich anschließend wird zur Ermittlung der Zugfestigkeit und der Reißdehnung eine höhere Geschwindigkeit eingestellt.⁶⁴

⁶³ Niedrige Geschwindigkeiten simulieren zum Beispiel fallenden Schnee, die hohen sind für Windbelastung zu wählen. Für Anwendungen im Außenbereich empfiehlt es sich, das komplette Programm zu prüfen, als Minimalvariante zumindest die niedrigste und die höchste Geschwindigkeit zu wählen.

⁶⁴ Vergleiche hierzu Grellmann 2005, Seite 120 f.

5.2 Kennwertermittlung an in-situ-Prüfkörpern

In-situ-Prüfkörper bestehen aus dem Klebstoff in Verbindung mit den Fügeteilen. Im Gegensatz zu den Untersuchungen an Substanzprüfkörpern wird hier die Klebung im Verbund getestet. Der Vorteil liegt im Erfassen des komplexen Zusammenwirkens der Einzelkomponenten in der Verbindung. Hervorgerufen durch die gegenseitigen Wechselwirkungen bildet sich am Übergang zum Füge­teil in der Klebschicht eine Grenzschicht aus, die durch veränderte Eigenschaften gekennzeichnet ist.⁶⁵ Bei der Verwendung von in-situ-Prüfkörpern werden die Materialeigenschaften als gemittelte Werte über die Klebfugendicke angegeben. Sie setzen sich aus den erhöhten Werten im Bereich der Grenzschicht als auch aus den Werten des Polymersubstanz (Bulk) im mittleren Bereich der Klebschicht zusammen.

Durch die steifen Füge­teile tritt bei in-situ-Prüfkörpern eine Querdehnungsbehinderung des Klebstoffes auf. Unter Belastung kann sich der Klebstoff nicht ungehindert verformen. Durch das Anhaften des Klebstoffes am Füge­teil wird die Verformungsmöglichkeit im substratnahen Bereich behindert. Der Einfluss der Querdehnungsbehinderung ist von der Steifigkeit der Füge­teile und von der Geometrie des Probekörpers abhängig.

Vereinfacht kann die Steifigkeit des Klebstoffes und die daraus resultierende Verformung der Klebfuge in zwei Bereiche eingeteilt werden. Im mittleren Bereich der Klebfuge mit der Gesamtdicke d_K stellt sich der Verformungswinkel γ_1 ein. Hier tritt der Klebstoff mit den Materialeigenschaften der reinen Polymersubstanz auf. Das steifere Verhalten im Randbereich aufgrund der Ausbildung der Grenzschicht und der Verformungsbehinderung durch die Füge­teile ist durch den Verformungswinkel γ_2 gekennzeichnet. Beeinflusst wird dieser von dem Material der Füge­teile, der mechanischen Oberflächenbearbeitung und der Oberflächenvorbehandlung. Aus diesem Grunde sollen in-situ-Prüfkörper immer an der konkreten Anwendung ausgerichtet werden, um durch die verwendeten Füge­teilmaterialien und die gewählte Klebstoffdicke sowohl die Materialkennwerte der Klebstoffschicht

⁶⁵ Vergleiche hierzu Kapitel 6 dieser Arbeit.

als auch die maximal aufnehmbaren Kräfte zutreffend zu ermitteln.

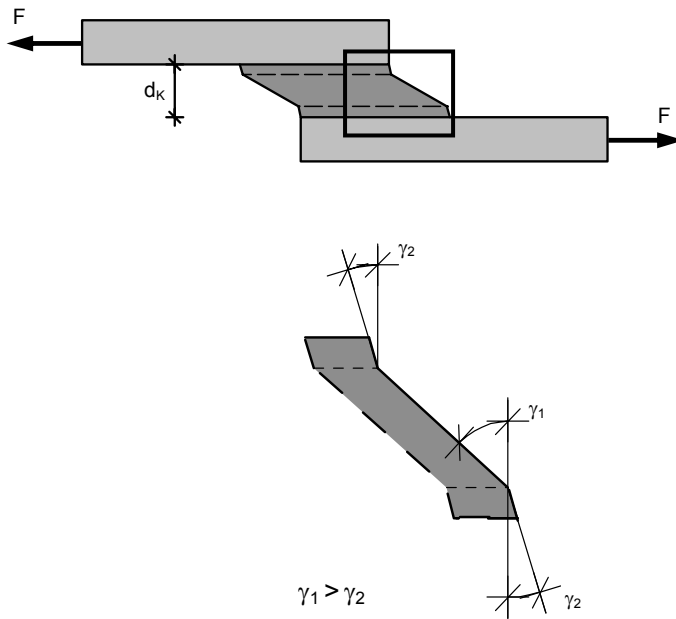


Bild 22 Schematische Darstellung der Klebschichtverformung. Die fügeteilnahe Schicht des Klebstoffes verhält sich durch die Grenzschichtausbildung und die Verformungsbehinderung durch die Fügeteile steifer als der mittlere Bereich der Klebschicht. Vereinfacht ist dieses Verhalten mit den Winkeln γ_1 und γ_2 dargestellt. In Wirklichkeit gestaltet sich der Übergang fließend.

Für Klebungen mit Fügeteilen aus Stahl existieren genormte in-situ-Prüfkörper, an denen die Zugscherfestigkeit und das Verformungsverhalten bestimmt werden.⁶⁶ Gängige Aufbauten bestehen aus Prüfkörpern mit einschnittig überlappten Verklebungen, wie der dünnen Zugscherprobe nach EN 1465. Zwei dünne Metallbleche gleicher Länge werden überlappend verklebt. Hierbei wird eine Zugkraft entlang der Hauptachse der Prüfkörper eingeleitet und die Klebfuge auf Schub belastet. Die Prüfung ist kraftgesteuert mit einer stetig zunehmenden Belastung zu fahren. Die Geschwindigkeit ist so zu wählen, dass die Klebung innerhalb von (65 ± 20) s zerstört wird.

⁶⁶ Vergleiche hierzu EN 1465 und EN 14869-2. Prüfkörper mit veränderten Geometrien zur verbesserten Auswertung sind Gegenstand der laufenden Forschung. Vergleiche hierzu beispielsweise Schlimmer 2007.

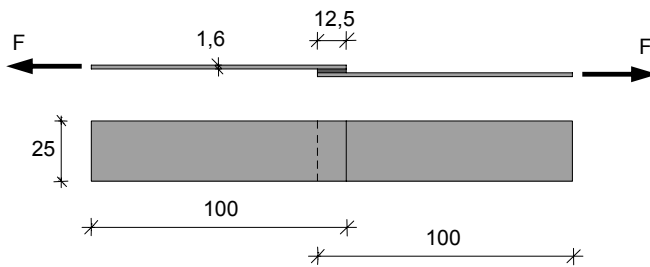


Bild 23 Dünne Zugscherprobe nach EN 1465. Zwei dünne lange Bleche werden über eine Klebung miteinander verbunden.

Maße in [mm]

Ein weiterer Prüfaufbau - die dicke Zugscherprobe - wird in EN 14869-2 beschrieben. Im Gegensatz zu der dünnen Zugscherprobe entsteht hier durch die geringere Verformung der dickeren und kürzeren Fügeteile eine gleichmäßigere Schubspannungsverteilung in der Klebfuge. Die Versuche an der dicken Zugscherprobe sind mit einer konstanten Transversengeschwindigkeit zu fahren. Empfohlen wird eine Geschwindigkeit von 0,5 mm/min. Bei einer klebfugennahen Verformungsmessung kann durch Elimination der Fügeteilverformung eine Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Klebstoff aufgestellt werden. Daraus lässt sich gemittelt über die Klebschichtdicke und für die gewählte Fügeteilkombination der Schubmodul bestimmen.

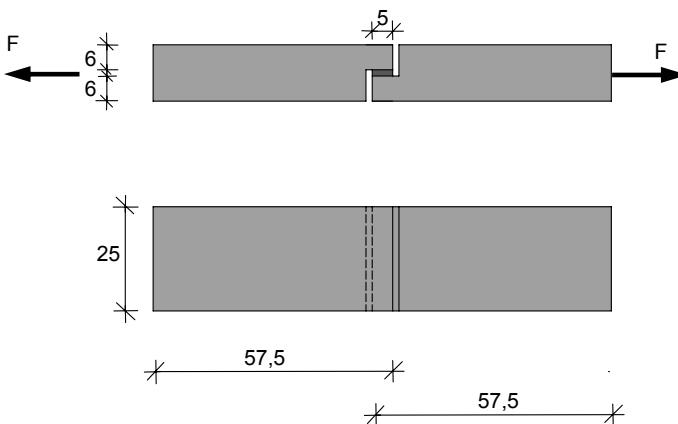


Bild 24 Dicke Zugscherprobe nach EN 14869-2. Im Bedarfsfall kann jedes Fügeteil aus zwei zusammengeklebten Einzelteilen bestehen.

Maße in [mm]

Für Glas-Metall-Klebung können diese Zugscherversuche nicht angewendet werden. Aufgrund der Sprödigkeit des Glases können nur geringe Zugkräfte in das Material eingeleitet werden. Infolge dessen wurde eine Prüfanordnung entwickelt, um über eingeleitete Druckkräfte die Scherfestigkeit an einschnittig überlappend geklebten Prüfkörpern zu

ermitteln.⁶⁷ Durch die gewählte Probengeometrie treten lediglich geringfügige Biegebeanspruchungen in den Fügeteilen auf. Die Beanspruchung der einschnittig überlappenden Klebung erfolgt stirnseitig auf Druck. Die Klebfugendicke kann variiert werden.⁶⁸

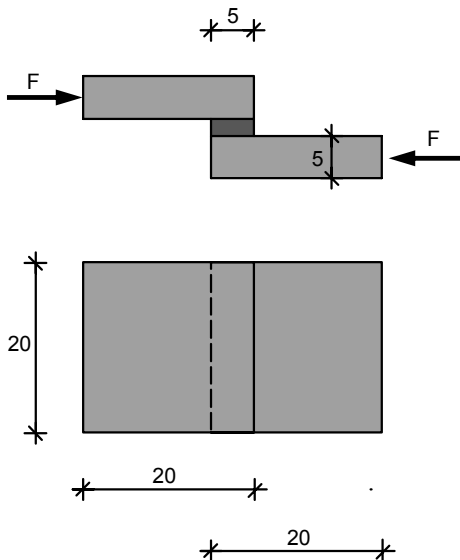


Bild 25 Druckscherprüfkörper nach DELO-Norm 5 in Weigel 2007.

Maße in [mm]

Der Idealfall einer annähernd konstanten Schubbeanspruchung der Klebfuge stellt sich bei starren Fügeteilen und bei Verbindungen ein, die keine Verdrehung zulassen.⁶⁹ Tatsächlich tritt bei einfach überlappten Klebverbindungen ein inhomogener Spannungszustand auf, der durch die Überlagerung der Einflüsse der einzelnen Fügeteilpartner entsteht.

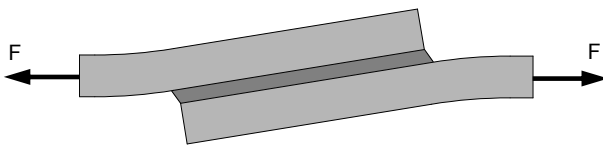


Bild 26 Schematische Darstellung der Verformung einer einschnittigen Klebverbindung durch exzentrischen Lastangriff.

⁶⁷ DELO-Norm 5. Vergleiche hierzu Weigel 2007, Seite 171.

⁶⁸ Eine Weiterentwicklung des Prüfaufbaus, vergleiche hierzu ISO 13445, erweist sich als sinnvoll, um durch eine genauer herzustellende Klebfluggengeometrie weniger streuende Ergebnisse zu erhalten. Für die Alterungstests zeigt sich das Verhältnis von geklebter Fläche zu freiem Rand, an dem die schädigenden Kräfte einwirken, als zu ungünstig. Ein Aufbau mit einer größeren Klebfläche, bei dem die Verformungsmessung mit einem berührungslosen Videoextensometer ausgeführt werden kann, wird in Geiß 2008, Seite 63 vorgestellt.

⁶⁹ Die nachfolgenden Darstellungen sind an Habenicht 2006, Seite 413 ff. und Shadow 2006, Seite 38 f. angelehnt.

Die Verschiebung der Füge Teile in Kraftrichtung erzeugt eine gleichmäßige Schubbeanspruchung in der Klebfuge. Zusätzlich tritt durch die Dehnung der Füge Teile eine Schubbeanspruchung in der Klebschicht auf, die an den Überlappungs-enden den größten Wert aufweist. Durch die exzentrische Krafteinleitung tritt in der Klebfuge ein Biegemoment auf. Dies führt an den Überlappungs-enden zusätzlich zu Spannungen normal zur Klebfläche.⁷⁰

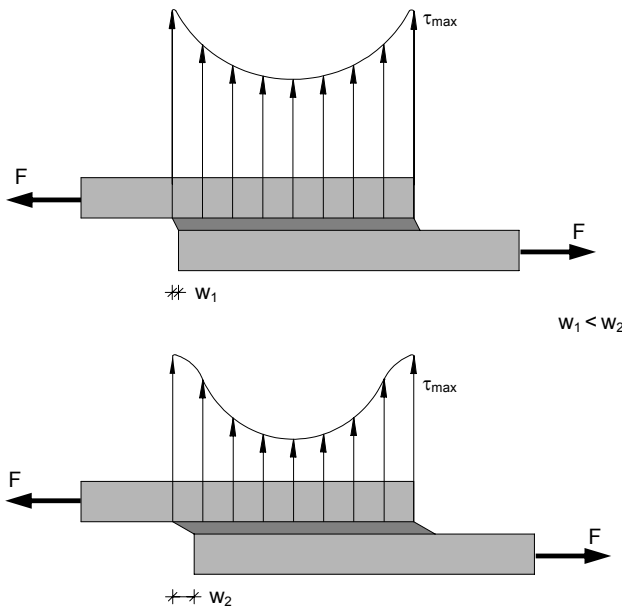


Bild 27 Spannungsverteilung eines einschnittig überlappten Zugscherprüfkörpers. Die Ausbildung der Spannungsspitzen ist vom Verhalten der Klebschicht abhängig. Oben ist die Spannungsverteilung eines verformungsarmen Klebstoffes, unten die eines plastischen Klebstoffes dargestellt. Dabei tritt bei konstanter Kraft F eine geringere maximale Schubspannung τ_{\max} an den Klebfugenenden auf.

Die Ausbildung der Spannungsspitzen ist stark von dem Verformungsvermögen der Klebschicht abhängig. Bei gleicher angreifender Last F treten bei verformungsarmen Klebstoffen kleine Verformungen w_1 auf, die an den Überlappungs-enden größere Spannungsspitzen erzeugen. Dagegen

⁷⁰ Volkersen bietet einen Berechnungsansatz für einschnittig überlappte schubbeanspruchte Nietverbindungen, der bei Annahme einer gleichmäßig ausgebreiteten Verbindungsschicht auch für Klebverbindungen angewendet werden kann. Unter Einbeziehung der Werkstoffparameter und der Klebfugegeometrie ergibt sich aus dem Verhältnis von der maximalen Schubspannung an den Überlappungs-enden zur mittleren Schubspannung in der Klebung eine gute Ausgangsbasis zur Betrachtung einschnittig überlappter Klebverbindungen. Eingeschränkt wird die Anwendbarkeit durch die Vernachlässigung der Klebschichtdicke und der Überlappungslänge auf die Klebfestigkeit, die jedoch beide einen Einfluss auf die Klebfestigkeit haben. An Vergleichsberechnungen mit FE-Modellen zeigt sich dennoch eine gute Übereinstimmung mit der analytischen Lösung nach Volkersen. Vergleiche hierzu Volkersen 1938, Seite 41 ff., Habenicht 2006, Seite 450, Wirth 2004, Seite 18 ff. und Schadow 2006, Seite 41.

kommt es bei plastischen Klebstoffmaterialien trotz einer größeren Füge­teilverschiebung w_2 zu geringeren Spannungsspitzen τ_{\max} an den Klebfugenrändern.

Um den ungleichförmigen Spannungsverlauf von einschnittig überlappten Scherproben zu vermeiden und einen möglichst homogenen Spannungsverlauf zu erzeugen, wurde ein Prüfkörper aus stumpf geklebten Hol­zylindern entwickelt.⁷¹ Zwei Hol­zylinder werden mit dem zu untersuchenden Klebstoff verbunden und auf Torsion oder Zug belastet. Kombinierte Belastungen ebenso wie Untersuchungen in verschiedenen Temperaturbereichen sind ausführbar. Diese Versuche liefern sehr aussagekräftige Ergebnisse, da durch die geschlossene ringförmige Klebung ein nahezu gleichmäßiger Schubspannungsverlauf entsteht.

Zusätzlich zu dem Verhalten der Klebverbindung bis zum Bruch kann für den elastischen Anfangsbereich neben dem Schubmodul G ebenfalls der Elastizitätsmodul E und die Querdehnzahl ν ermittelt werden. Die so ermittelten Kennwerte liefern eine geeignete Basis für eine Berechnung geklebter Verbindungen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Prüfkörper für Glas-Metall-Klebungen weiterentwickelt.⁷²

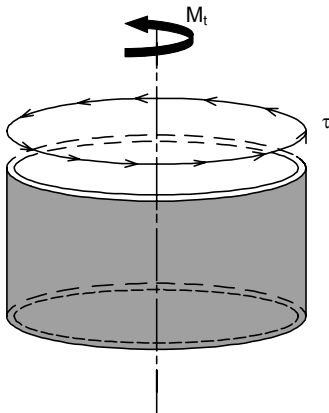


Bild 28 Hol­zylinder unter Torsionsbelastung. Durch die Geometrie entsteht ein gleichmäßiger Schubspannungszustand.

⁷¹ Vergleiche hierzu EN 14869-1 und Schlimmer 2004.

⁷² In Kapitel 8 wird die Kennwertermittlung an der Rohrprobe beschrieben.

6 Grenzschnittbetrachtung

6.1 Grundlagen

Kleilverbindungen bestehen aus Fügeteilen, zwischen denen der Klebstoff die Verbindung herstellt.⁷³ Das Fügeteil aus Metall ist oft von einer Oxidschicht überzogen. Diese bildet die eigentliche Fügeteiloberfläche. Meistens befindet sich zwischen Oxidschicht und Klebstoff eine weitere Schicht, die aus dem Primer oder Haftvermittler besteht. Das Polymer stellt keine homogene Schicht dar, sondern lässt sich vereinfacht in die innere Schicht mit dem unveränderten Klebstoffmaterial (Bulkmaterial) und in die Grenzschnitt ein- teilen.

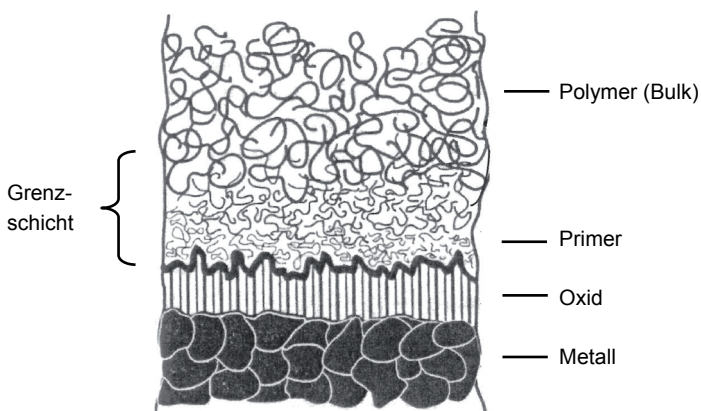


Bild 29 Schichten einer Kleilverbindung. Am Übergang von Klebstoff zu Fügeteil bildet sich eine Grenzschicht mit gradierten Eigenschaften. In dem mittleren Bereich der Klebschicht befindet sich das unveränderte Bulkmaterial.

Metalloberflächen beeinflussen abhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung und ihrem topografischen Zustand über molekulare Wechselwirkungen an der Grenzfläche die Struktur der Polymere. Es entstehen gradierte Strukturen mit abgestuften mechanischen Eigenschaften im Klebstoff. Die Bereiche, in denen die Eigenschaften von denen des Bulkmaterials abweichen, werden als Grenzschicht bezeichnet. Diese haben Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Kleilverbindung. Besonders bei dünnen Kleilverbindungen ist diese Beeinflussung deutlich.

⁷³ Diese Erläuterungen dieses Abschnittes basieren auf Habenicht 2006, Seite 295 ff., Kleinert 2001 und Phung 2005, Seite 3 ff.

Die Klebverbindung wird durch zwei Erscheinungen zusammengehalten, die gleichverantwortlich nebeneinander stehen. Zum einen beruht die Festigkeit einer Klebung auf der inneren Festigkeit, der Kohäsion. Zum anderen wird sie durch die Haftung oder Adhäsion beeinflusst.⁷⁴ Zur Verbesserung der Adhäsion ist die Betrachtung der Grenzschicht wesentlich. Sie hat nicht nur einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften einer Klebschicht, sondern ist ebenfalls ausschlaggebend für die Alterungsbeständigkeit der Klebverbindung. Diese kann durch gezielte Oberflächenvorbehandlungen beeinflusst werden.

Die Erforschung der Grenzschicht liefert einen entscheidenden Beitrag zur Verbesserung der Beanspruchbarkeit und Dauerhaftigkeit von Klebverbindungen.

6.2 Mikrothermische Analyse μ TA™

Zur Analyse der Grenzschicht stehen unter anderem die mikrothermische Analyse μ TA™ und LAwave® zur Verfügung.⁷⁵ Mit der mikrothermischen Analyse μ TA™, einer Weiterentwicklung der Rasterkraftmikroskopie, kann eine Klebfuge zerstörungsfrei thermisch charakterisiert werden. Im Besonderen bietet sich diese Methode zur Analyse der Grenzschicht mit den sich ändernden Eigenschaften an. Die Charakterisierung wird über die Bestimmung der Glasübergangstemperatur⁷⁶ des Klebstoffes vorgenommen. Die Raster Spitze wird definiert aufgeheizt und die elektrische Leistung zur Aufrechterhaltung der vorgegebenen Heizrate gemessen. Aus der Höhe der Glasübergangstemperatur können Aussagen zur Netzwerkdicke und Klebstoffstruktur getroffen werden. Eine hohe Glasübergangstemperatur spricht für eine hohe Vernetzung des Materials.⁷⁷

⁷⁴ Die Adhäsion wird unterteilt in die spezifische und die mechanische Adhäsion. Bei speziellen kautschukelastischen Polymeren tritt weiterhin die Autohäsion auf. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 325 ff.

⁷⁵ Vergleiche hierzu Häßler 2000, Habenicht 2006, Seite 815 und Kleinert 2001.

⁷⁶ Die Glasübergangstemperatur T_g bezeichnet die Temperatur, bei der sich ein hartes Material in eine gummielastische Phase umwandelt. Unterhalb der Glasübergangstemperatur verhält sich das Material steif, oberhalb dagegen weich. Vergleiche hierzu Kothe, 2008, Seite 11.

⁷⁷ Vergleiche hierzu Häßler 2000 und Kleinert 2001.

An einem kleinen Ausschnitt am Übergang von Metall zu Klebstoff wird mit der mikrothermischen Analyse μTA^{TM} eine lokale thermische Analyse zur Aufnahme der Wärmeleitfähigkeit vorgenommen. Anhand der Helligkeit der Aufnahme kann auf die Wärmeleitfähigkeit geschlossen werden. Eine gute Wärmeleitfähigkeit ist durch eine helle Darstellung im Wärmeleitfähigkeitsbild gekennzeichnet. Je mehr die Helligkeit abnimmt, umso schlechter wird die Wärmeleitfähigkeit. Dadurch können Aussagen zur Netzwerkdichte getroffen werden. In den dunkleren Bereichen ist die Netzwerkdichte deutlich höher als in den helleren Bereichen.

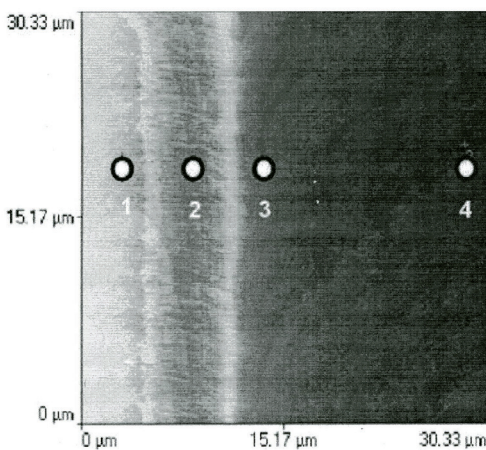


Bild 30 Wärmeleitfähigkeitsbild am Übergang von Metall zu Epoxidharzklebstoff. Der Messpunkt 1 liegt im metallischen Bereich, Messpunkt 2 in der Oxidoberfläche, die Messpunkte 3 und 4 im Klebstoff. Eine helle Tönung weist auf eine hohe Wärmeleitfähigkeit hin, dunklere Farbtöne auf eine geringere. Neben der Farbänderung von Metall zu Klebstoff ist ebenfalls eine Farbvertiefung zwischen Messpunkt 3 und 4 zu erkennen.

An den ausgewählten Messpunkten werden durch eine lokale thermische Analyse die im folgenden Bild dargestellten Kurven ermittelt. An Messpunkt 1 (Metall) und Messpunkt 2 (Oxidschicht) ist als Ergebnis ein Verlauf zu erkennen, der die thermische Ausdehnung ohne Erweichung darstellt. Die Kurven der Messpunkte 3 und 4 stellen einen für Polymere typischen Verlauf mit einem Knick bei Erreichen der Glasübergangstemperatur dar. Die Glasübergangstemperatur in unmittelbarer Nachbarschaft der Oxidschicht ist deutlich höher als die des Bulkmaterials.

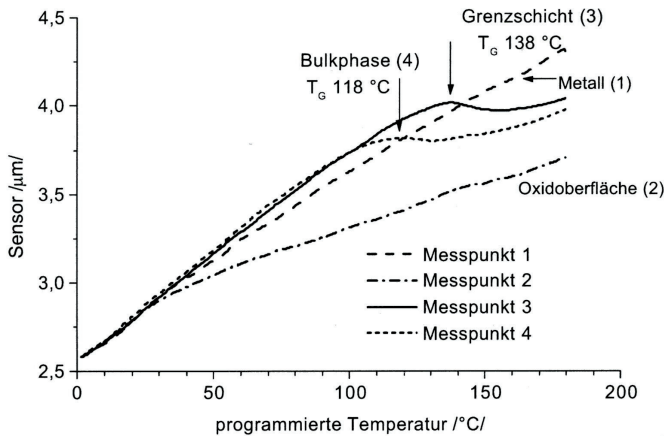


Bild 31 Ermittlung der Glasübergangstemperatur mit der mikrothermischen Analyse μTA^{TM} . Die Bezeichnung der Kurven erfolgt wie im vorherigen Bild.

Die Untersuchungen weisen nach, dass am Übergang zur Metalloberfläche die Polymerstruktur eine höhere Netzwerkichte als in der Bulkphase aufweist. Somit kann von einem höheren Elastizitätsmodul ausgegangen werden. In einem Abstand von etwa $15\ \mu\text{m}$ ist der Einfluss abgeklungen und das reine Bulkmaterial liegt an. Zwar kann von dem Verhältnis der Glasübergangstemperatur zwischen Bulkphase und Grenzschicht nicht auf ein Verhältnis oder Zahlenwert des Elastizitätsmoduls geschlossen werden. Dennoch wird festgestellt, ab welchem Abstand von der Grenzfläche das Materialverhalten des Bulkmaterials einsetzt. In weiterführenden Untersuchungen wurde der Einfluss der Fügeiteilvorbehandlung auf die Vernetzungsdichte im Grenzschichtbereich und in der Bulkphase untersucht. Chemische Vorbehandlungsmaßnahmen nehmen einen deutlich stärkeren Einfluss auf die Ausbildung der Grenzschicht als eine mechanische Vorbehandlung.

6.3 LAwave[®]

Die zweite Methode zur Untersuchung der Grenzschicht wurde am Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS in Dresden entwickelt. LAwave[®] ist eine laserakustische Methode, die auf hochfrequenten Ultraschalloberflächenwellen basiert.⁷⁸

⁷⁸ Vergleiche hierzu Jansen 2004b und IWS 2005, Seite 84 und 100.

Der Klebstoff wird mit Spincoating⁷⁹ in einer sehr dünnen Schicht auf das Füge­teil aufgebracht. Laserimpulse regen akustische Oberflächenwellen an, die sich durch das Material ausbreiten. Ein Detektor misst die Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die Aufzeichnung wird mathematisch bearbeitet. Bei exakter Dickenmessung kann daraus über Zusammenhänge in der Atomstruktur der Elastizitätsmodul abgeleitet werden.

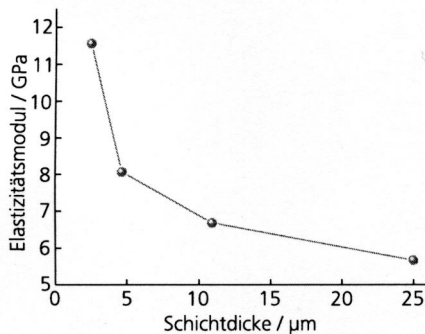


Bild 32 Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Klebstoffdicke ermittelt mit LAwave®. Je dicker die Klebstofffuge, umso geringer ist der Elastizitätsmodul.

Die Messergebnisse des Elastizitätsmoduls an einer offenen Klebung sind für verschiedene Schichtdicken dargestellt. Bei geringen Schichtdicken besitzt die Klebschicht einen hohen Elastizitätsmodul. Bei dicker werdender Klebfuge nimmt der über die Schichtdicke gemittelte Elastizitätsmodul ab, bis er sich nach einem raschen Abfall dem des Bulkmaterials annähert. Als obere Grenze für die Messbarkeit ist je nach verwendetem Klebstoff eine Schichtdicke von 0,10 mm bis 0,25 mm anzusetzen. Bei stärkeren Dicken werden die Oberflächenwellen durch das Polymer so stark gedämpft, dass keine genauen Messungen durchgeführt werden können.

⁷⁹ Spincoating ist eine Methode, um dünne Schichten in gleichmäßiger Dicke herzustellen. Nach dem Auftrag der Polymerlösung wird das Füge­teil zur Rotation gebracht. Durch die Zentrifugalkräfte verteilt sich der Klebstoff, überschüssiger Klebstoff wird über den Rand des Füge­teils geschleudert.

7 Kennwertermittlung an Substanzprüfkörpern

7.1 Grundlagen

Prüfkörper aus dem reinen Klebstoffmaterial, die sogenannten Substanzprüfkörper oder Schulterstäbe, bieten sich an, um die Materialkennwerte des Klebstoffes zu ermitteln. Vergleichend zu in-situ-Prüfkörpern ist dabei keine Dehnungsbehinderung durch steife Fügeteile vorhanden, so dass aus der Zugspannungs-Längsdehnungs-Beziehung direkt der Elastizitätsmodul berechnet und eine Aussage zur Streckgrenze getroffen werden kann. Die gleichzeitige Messung der Dehnung in Querrichtung ermöglicht die Bestimmung der Querdehnzahl. Man gelangt so auf einfache Weise zu einem umfangreichen und aussagekräftigen Bild über das Verhalten von Klebstoffmaterialien unter verschiedenen Einflussparametern. Hierbei können die Temperatur und die Prüfgeschwindigkeit verändert, sowie Einflüsse aus Lagerungsdauer und Aushärteintensität begutachtet werden. Bei Verwendung gleicher Eingangsparameter kann mit dieser Verfahrensweise ein guter Vergleich zu anderen Klebstoffmaterialien gezogen werden.

Zwei typische Vertreter der Acrylatklebstoffe wurden auf diese Weise näher untersucht. Beide wurden auf Grund ihrer Ausgangseigenschaften für Klebungen im Glasbau in Betracht gezogen. Der Photobond 4468, ein etablierter Klebstoff für Glasklebungen im Innenbereich und für punktförmige Klebungen empfohlen, wurde als Prototyp einem umfangreichen Versuchsprogramm unterworfen.⁸⁰ Mit dem Photobond GB485, der auf Grund seiner Viskosität für linienförmige Klebungen empfehlenswert erscheint, wurde zum Vergleich ein reduziertes Programm durchgeführt.⁸¹

Zusätzlich wurden unterstützend dynamisch-mechanische Analysen (DMA) durchgeführt, um das temperaturabhängige Materialverhalten näher zu beschreiben und die Glasübergangstemperatur zu bestimmen.

⁸⁰ Empfohlen wird der Photobond 4468 für Klebungen von Türscharnieren oder Punkthaltern. Vergleiche hierzu DELO 2006.

⁸¹ Die Versuche an den Substanzprüfkörpern sind im Anhang dieser Arbeit dokumentiert. In der Regel bestand eine Versuchsreihe aus drei beziehungsweise fünf Prüfkörpern.

7.2 Probengeometrie und Herstellung

Es wurden weitestgehend Prüfkörper des Typs 1B nach ISO 527-2 verwendet.⁸²

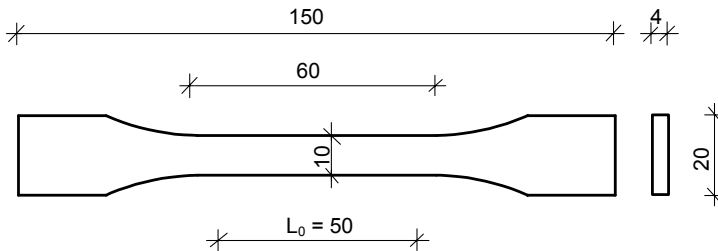


Bild 33 Prüfkörper Typ 1B nach ISO 527-2.

Maße in [mm]

Zur Herstellung der Schulterstäbe wurde eine Negativform aus Teflon verwendet. Diese wurde mit dem flüssigen Klebstoff blasenfrei ausgegossen. Um eine Sauerstoffinhibierung zu vermeiden, wurde der flüssige Klebstoff zum Aushärten mit einer Folie abgedeckt.⁸³ Das Aushärten des Klebstoffes wurde nach Herstellerangaben mit der UV-Lampe DELO-LUX 03 durchgeführt.

Die Schulterstäbe wurden mit Markierungen versehen, um die Verformungsmessung mittels Videoextensometrie zu ermöglichen. In axialer Richtung ist der nach ISO 527-2 geforderte Abstand der Messlänge L_0 einzuhalten. Dabei sollen beide Messmarken annähernd gleich weit von der Mitte entfernt liegen. Die Markierungen zur horizontalen Messung lagen in der Mitte mit einem möglichst weiten Abstand voneinander. Vor der Versuchsdurchführung wurde jeder Prüfkörper auf Fehlstellen kontrolliert und vermessen.⁸⁴ Dabei wurden in der Mitte und nahe der beiden äußeren Messpunkte jeweils die Dicke und die Breite ermittelt. Von diesen drei Werten wurde aus dem jeweils kleinsten und größten der Mittelwert gebildet.

⁸² Für einige wenige Ausnahmen wurde der Typ 1A verwendet. Beide Formen unterscheiden sich lediglich in der Ausbildung der Schultern. Der Bereich, in dem die Messung erfolgt, hat identische Abmessungen.

⁸³ Verwendet wurde eine Folie aus Polyethylenterephthalat (PET), die zu diesen Klebstoffen eine sehr geringe Haftung ausbildet. Sie konnte nach dem Aushärten problemlos abgezogen werden.

⁸⁴ Vergleiche hierzu ISO 527-1, Abschnitt 6.4 und 9.2.

7.3 Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden mit einer Universalprüfmaschine der Firma Instron mit einer Kraftmessdose von 5 kN durchgeführt. Um die Prüfanordnung befand sich eine integrierte Temperierkammer, die während des Versuchs eine konstante Temperatur gewährleistet. Mit dieser Kammer können die geforderten Temperaturen von -20 °C bis $+80\text{ °C}$ eingestellt werden. Zur Verformungsmessung wurde ein biaxiales Videoextensometer herangezogen, das gleichzeitig zur axialen auch die transversale Verformung aufnehmen konnte. Für die Versuche unter Temperatur wurden die Prüfkörper vorab für $24 \pm 4\text{ h}$ in einem externen Klimaschrank gelagert und von der temperierten Luft umspült.

Um Unregelmäßigkeiten durch Anfahrereffekte der Prüfmaschine zu vermeiden, wurde generell eine Vorkraft aufgebracht, die jeden Prüfkörper in eine vergleichbare Ausgangslage bringt. Einen Anhaltswert liefern die Angaben der ISO 527-1, wonach die Vorkraft in Abhängigkeit des erwarteten Zugmoduls⁸⁵ beziehungsweise der wesentlichen Spannungen zu wählen ist.⁸⁶ Diese Versuche wurden mit einer Vorkraft von 3 N gefahren. Lediglich bei den Versuchen unter hohen Temperaturen musste diese auf Grund des weichen Materialverhaltens auf 1 N reduziert werden.

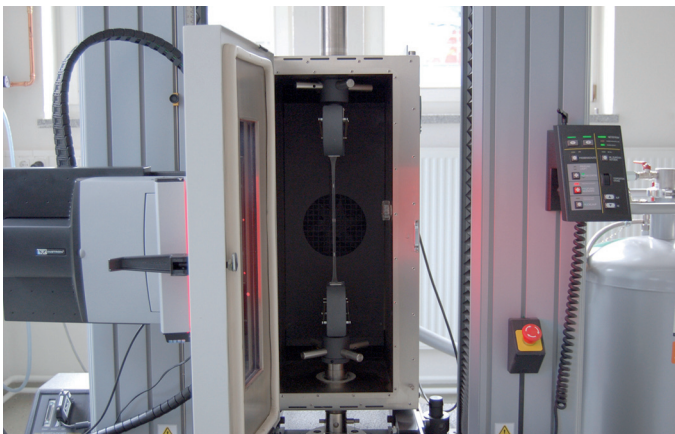


Bild 34 Universalprüfmaschine mit Temperierkammer. In der Prüfvorrichtung ist ein Schulterstab zu sehen, der bereits bis zum Anschlag an das Gehäuse gedehnt wurde. Auf die Tür der Kammer, die während des Versuchs geschlossen bleibt, ist das Videoextensometer montiert. Rechts ist der Vorratsbehälter mit flüssigem Stickstoff erkennbar, mit dem tiefe Temperaturen in der Temperierkammer erzeugt wurden.

⁸⁵ Der Zugmodul beschreibt die Anfangssteigung in der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung. Werden die Versuche mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt, so kann der Zugmodul dem Elastizitätsmodul gleichgesetzt werden. Vergleiche hierzu ISO 527-1, Kapitel 9.6 und ISO 527-2, Kapitel 9.

⁸⁶ Vergleiche hierzu ISO 527-1, Kapitel 9.4.

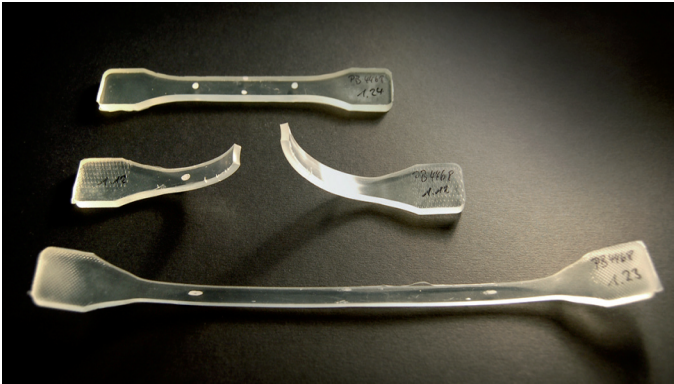


Bild 35 Prüfkörper Typ 1B nach ISO 527-2 mit den vier Messmarken. Im Hintergrund liegt eine noch unbelastete und ungedehnte Probe.

Da die Versuche in der Temperierkammer durchgeführt wurden, mussten sie beim Erreichen des Anschlagpunktes am Gehäuse gestoppt werden. Obwohl deshalb nicht alle Versuche bis zum Bruch gefahren werden konnten, wurde dennoch das Materialverhalten weitestgehend abgebildet. In einigen wenigen Fällen, besonders bei niedrigen Geschwindigkeiten und damit verbundenem hohen Zeitaufwand, wurden die Versuche vorzeitig abgebrochen, nachdem die für den baupraktisch relevanten Bereich erforderlichen Parameter abgelesen waren.

Die Querdehnzahl wurde im linearen Anfangsbereich der Querdehnungs-Längsdehnungs-Kurve ermittelt.⁸⁷ Sie wird als negativer Quotient aus transversaler Dehnung ε_t und axialer Dehnung ε_a gebildet.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}$$

Gleichung 2

Nicht immer war eine eindeutige Ermittlung der Querdehnzahl möglich. Bei den hohen und tiefen Temperaturen waren oftmals keine brauchbaren Werte zu erhalten.

Der Zugmodul wurde als Anfangssteigung aus axialer Dehnung und Spannung berechnet. Dabei werden die Dehnungswerte von 0,0005 und 0,0025 und die dazugehörigen Spannungswerte zugrunde gelegt. In Einzelfällen musste von den Vorgaben abgewichen werden. Unregelmäßigkeiten

⁸⁷ Vergleiche hierzu ISO 527-1, Kapitel 4.7 und 10.4.

durch Anfahreffekte zu Beginn der Spannungs-Dehnungs-Kurve erforderten in Ausnahmefällen eine geringfügige Verschiebung des Auswertebereichs. Der Zugmodul bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min wird für die Prüfkörper Typ 1A und 1B als Elastizitätsmodul definiert.⁸⁸

7.4 Variation der Geschwindigkeit

Nach ISO 527-1 werden verschiedene Geschwindigkeiten zur Ermittlung der Materialeigenschaften vorgeschlagen. Die Spannbreite reicht von 1 mm/min bis zu 500 mm/min und ist je nach Anwendungsfall festzulegen.⁸⁹

Prüfgeschwindigkeit [mm/min]	Photobond 4468	Photobond GB485
1	x	x
2	-	-
5	x	-
10	-	-
20	x	-
50	x	x
100	x	-
200	x	-
500	x	x

Tafel 2 Prüfgeschwindigkeiten nach ISO 527-1. Für den Photobond 4468 wurden bis auf zwei Geschwindigkeiten alle gefahren. Der Photobond GB485 wurde einem reduzierten Programm unterworfen. Neben der langsamsten und der schnellsten Geschwindigkeit wurde weiterhin eine mittlere Geschwindigkeit nach ISO 10350 gewählt.

Die folgende Auswertung basiert auf den gemittelten Werten. Die Mittelwertkurven enden beim Abbruch der ersten Messung aus der Serie. Aus jeder Versuchsreihe wurden neben dem Zugmodul und der Querdehnzahl ebenfalls die Streckgrenze⁹⁰ mit Spannung und Dehnung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit betrachtet.

⁸⁸ Zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls vergleiche Abschnitt 5.1.

⁸⁹ ISO 10350 reduziert die Spannbreite der Prüfgeschwindigkeiten. Spröde Klebstoffe sollen mit 5 mm/min, alle anderen mit 50 mm/min gefahren werden. Vergleiche hierzu Abschnitt 5.1.

⁹⁰ Die Streckspannung bezeichnet den ersten Spannungswert, bei dem ein Zuwachs der Dehnung ohne Steigerung der Spannung auftritt. Die Dehnung bei der Streckspannung wird als Streckdehnung bezeichnet. Vergleiche hierzu ISO 527-1, Abschnitt 4.3.1. In dieser Arbeit wurde der Begriff erweitert angewendet, um auch die Werte einzuschließen, bei dem sich ein Spannungs-Dehnungs-Verhalten mit einer flacheren Steigung anschließt. Gleichbedeutend mit dem Begriff Streckspannung wird in einigen Veröffentlichungen der Begriff Fließspannung verwendet. Vergleiche hierzu Barthel 2007 und Schlimmer 2004.

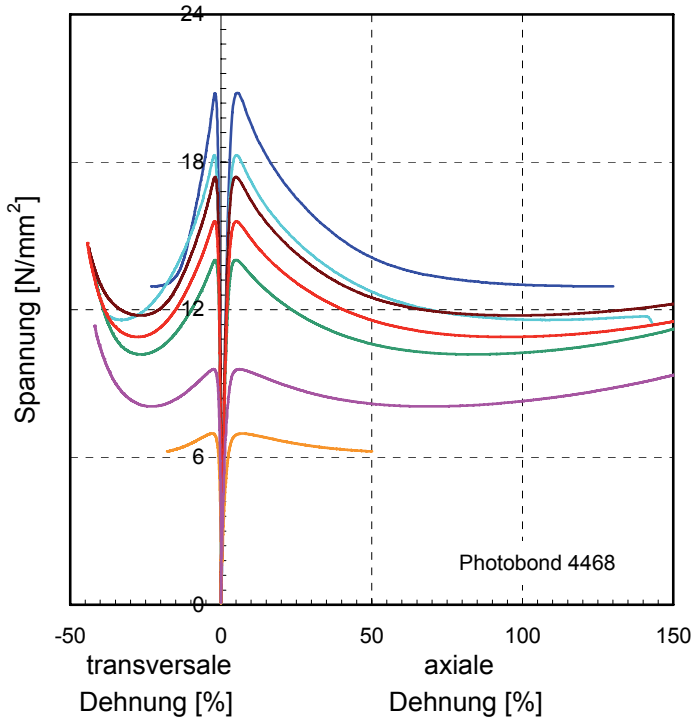


Bild 36 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Versuche bei 1 mm/min wurden nach ungefähr einer Stunde abgebrochen. Die anderen Kurvenverläufe wurden im Bedarfsfall bei Dehnungen von 150 % gekürzt.

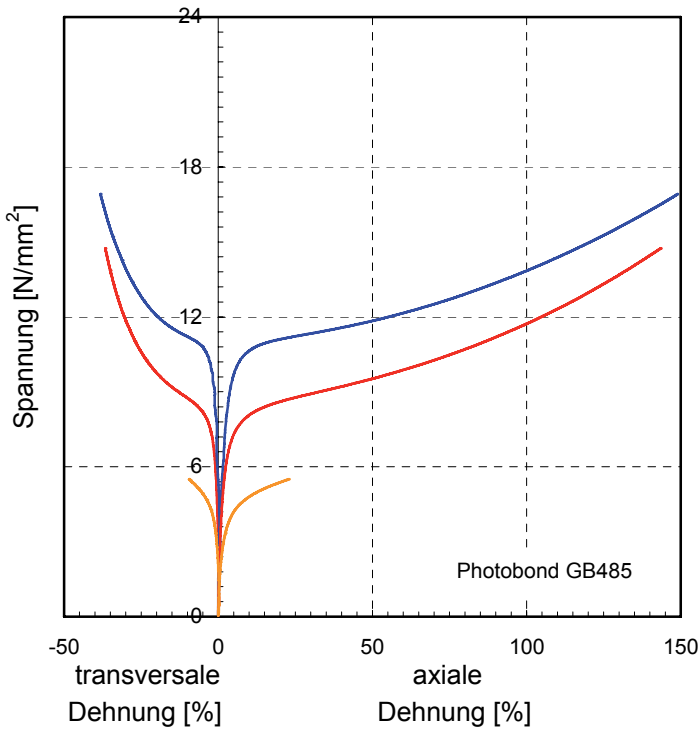


Bild 37 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei verschiedenen Geschwindigkeiten. Die Versuche bei 1 mm/min wurden nach etwa 30 Minuten abgebrochen.

Aus den Zugspannungs-Dehnungs-Beziehungen ist das geschwindigkeitsabhängige Verhalten beider untersuchter Acrylate deutlich festzustellen, aber auch die Unterschiede im Materialverhalten beider Klebstoffe.

Beide Klebstoffe weisen im Anfangsbereich ein lineares Verhalten auf. Der Photobond 4468 zeigt nach dem Erreichen der maximalen Spannungen einen ausgeprägten Bereich, in dem ansteigende Dehnungen bei abnehmenden Spannungen auftreten. Erst ab einer Dehnung von etwa 80 % verfestigt sich das Material erneut im geringen Umfang. Der Photobond GB485 zeigt hingegen näherungsweise ein bilineares Verhalten. Nach dem Erreichen der Streckgrenze folgt ein weiterer Spannungszuwachs. Die Unterschiede durch die Geschwindigkeitssteigerung fallen beim Photobond GB485 geringer aus.⁹¹

Die Auswertung zeigt einen Anstieg der Zugmoduln bei steigender Prüfgeschwindigkeit. Die Klebstoffe verhalten sich steifer, wenn sie schneller gedehnt werden. Beim Photobond 4468 ist diese Abhängigkeit stärker ausgeprägt als beim Photobond GB485. Ein ähnliches Verhalten zeigt sich bei der Auswertung der Streckspannung im Verhältnis zur Prüfgeschwindigkeit. Das Verhältnis Streckdehnung zur Geschwindigkeit zeigt ein differenziertes Bild. Bei höheren Geschwindigkeiten nehmen beim Photobond 4468 die Streckdehnungen ab. Der Photobond GB485 zeigt dagegen zunehmende Streckdehnungen bei steigender Geschwindigkeit.

Die Querdehnzahlen beider Klebstoffe stehen in scheinbar keinem Zusammenhang zur Geschwindigkeit. Insgesamt liegen die Werte für den Photobond GB485 um etwa 0,1 höher als beim Photobond 4468.

⁹¹ Das Auftreten der Streckspannung steht im Zusammenhang mit einer lokalen Verringerung des Querschnitts. Dort finden hohe irreversible Verformungen statt. Dadurch ergeben sich große Unterschiede zwischen nomineller und tatsächlicher Spannung beziehungsweise Dehnung. Die Darstellung mit wahren Spannungen und Dehnungen zeigt, dass es sich bei dem Spannungsabfall nach dem Erreichen der Streckgrenze nur um einen scheinbaren Geometrieeffekt handelt. Vergleiche Grellmann 2005, Seite 91 f. Im Anhang ist für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur und für eine Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min eine Gegenüberstellung von ingenieurmäßigen und wahren Spannungs- und Dehnungswerten beigelegt. Hier wurde auf die Darstellung von Cauchy-Spannung und Henky-Dehnung zurückgegriffen.

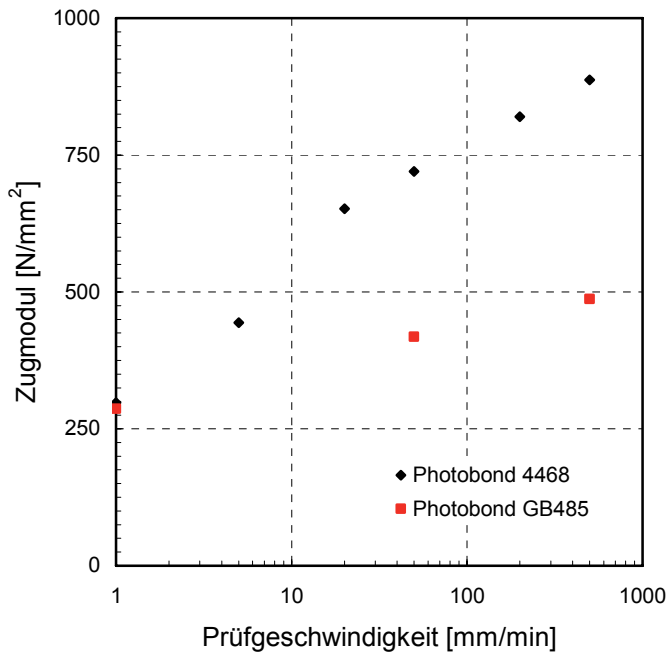


Bild 38 Anfangssteigung in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit in logarithmischer Skalierung. Bei beiden Klebstoffen steigen die Werte der Anfangssteigung bei zunehmender Geschwindigkeit. Beim Photobond 4468 ist diese Abhängigkeit stärker ausgeprägt.

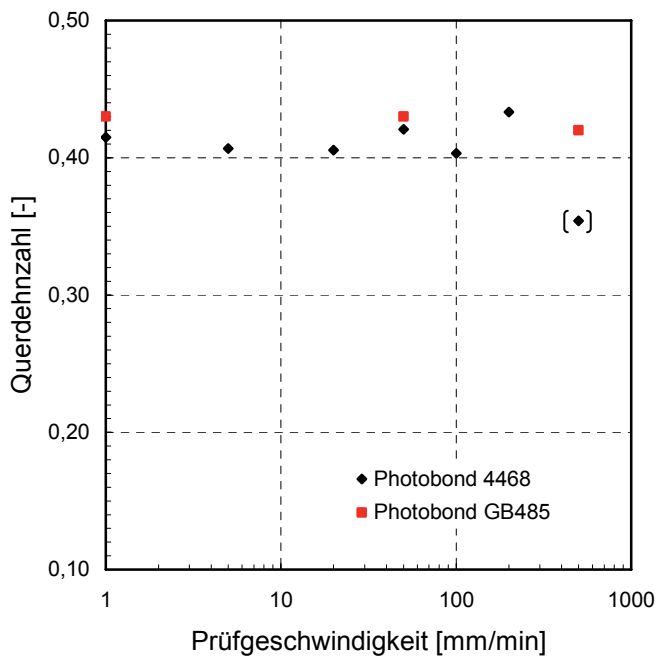


Bild 39 Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit in logarithmischer Skalierung. Bei der Geschwindigkeit von 500 mm/min konnte für den Photobond 4468 nur auf zwei Messungen zurückgegriffen werden. Dieser Wert ist nicht repräsentativ. Die ermittelten Querdehnzahlen scheinen keine Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit zu besitzen.

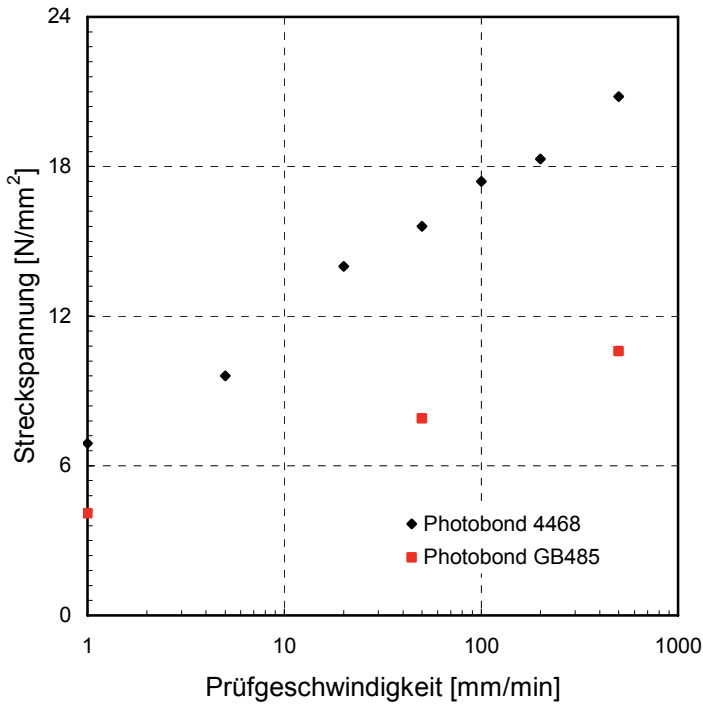


Bild 40 Streckspannung in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit in logarithmischer Skalierung. Bei beiden Klebstoffen nimmt die Streckspannung mit steigender Geschwindigkeit höhere Werte an.

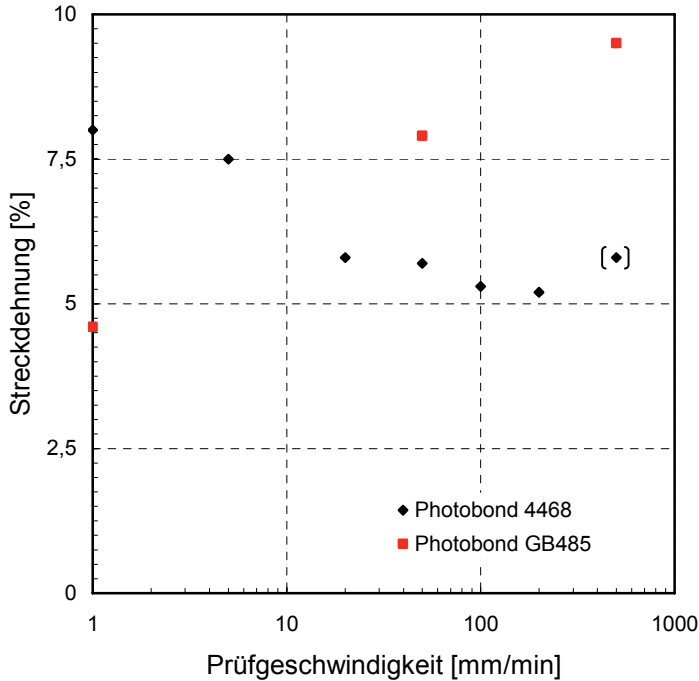


Bild 41 Streckdehnung in axialer Richtung in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit, dargestellt in logarithmischer Skalierung. Der Photobond 4468 zeigt bei höherer Geschwindigkeit eine geringere Streckdehnung. Der Photobond GB485 weist dagegen bei höheren Geschwindigkeiten steigende Streckdehnungen auf.

Das geschwindigkeitsabhängige Verhalten kann anhand des strukturellen Aufbaus der Acrylatklebstoffe erläutert werden. Die Polymerketten, die sich durch den Aushärtprozess bilden, sind an einigen Stellen vernetzt. Bei langsamer Belastung richten und strecken sich die Ketten in Krafrichtung. Bei hoher Geschwindigkeit hingegen fehlt den Polymerketten die Zeit, sich zu richten. Das Polymerknäuel nimmt höhere Kräfte bei gleichzeitig geringeren Dehnungen auf.⁹²

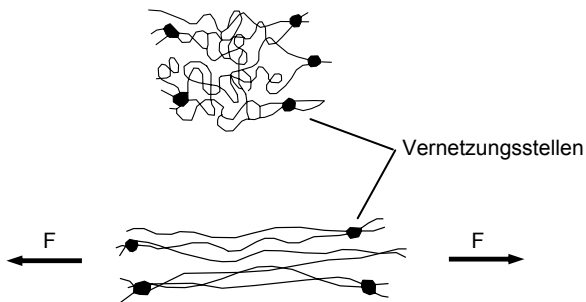


Bild 42 Polymerketten mit Vernetzungsstellen. Im ungedehnten Zustand, obere Darstellung, liegen sie ungeordnet vor. Durch Einwirken einer Zugkraft F richten sich die Ketten, untere Darstellung.

Dieses Verhalten ist bei den Klebstoffen zu beobachten. Der Zugmodul als Verhältnis von Spannung zu Dehnung im Anfangsbereich steigt mit zunehmenden Geschwindigkeiten. Der Photobond 4468 zeigt bei höheren Geschwindigkeiten ebenfalls höhere Streckspannungen bei gleichzeitig geringeren Streckdehnungen. Dagegen weist der Photobond GB485 bei steigenden Geschwindigkeiten höhere Streckspannungen, aber auch wachsende Streckdehnungen auf.⁹³

7.5 Variation der Temperatur

Der Einsatzbereich geklebter Glasverbindungen ist nicht nur auf den Innenbereich mit annähernd gleichbleibenden Temperaturen beschränkt. Geklebte Elemente, beispielsweise in einer Fassade, müssen für einen erweiterten Temperaturbereich beurteilt werden. Anhand der ETAG 002-1 wird ein Temperaturspektrum von -20 °C bis $+80\text{ °C}$ betrachtet. Neben den Untersuchungen bei Raumtemperatur wurden für den Photobond 4468 weitere Zwischenstufen eingeführt. Die

⁹² Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 469 f. und Ross 2005, Seite 282 ff.

⁹³ Diese Unterschiede basieren auf der chemischen Formulierung der Klebstoffe. Vergleiche hierzu die Datenblätter Delo 485 und Delo 4468.

Schulterstäbe wurden bei Geschwindigkeiten von 1 mm/min, 50 mm/min und 500 mm/min geprüft.

Prüftemperatur [°C]	Photobond 4468	Photobond GB485
-20	x	x
±0	x	-
+23	x	x
+40	x	-
+60	x	-
+70	x	-
+80	x	x

Tafel 3 Prüfprogramm der Temperaturabhängigkeit. Bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min wurde der Photobond 4468 einem Programm mit mehreren Temperaturzwischenstufen unterworfen. Alle weiteren Untersuchungen liefen bei Temperaturen von -20 °C, +23 °C und +80 °C.

Ein Vergleich der Ergebnisse bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min zeigt die deutliche Temperaturabhängigkeit beider Acrylaten.

Der Photobond 4468 zeigt sehr unterschiedliche Eigenschaften: Bei niedrigen Temperaturen ein äußerst sprödes Verhalten mit plötzlichem Bruch, bei hohen Temperaturen ein sehr nachgiebiges Verhalten mit hohen Dehnungen bei kleinen Kräften. Dabei fallen die Unterschiede bei Temperaturen von +60 °C, +70 °C und +80 °C sehr gering aus.

Der Temperatureinfluss zeigt sich auch beim Photobond GB485, jedoch in abgemilderter Form. Markant sind die Unterschiede bei den Versuchen unter tiefen Temperaturen. Nach einem steifen Anfangsverhalten treten steigende Dehnungen bei abnehmenden Spannungen auf. Nach einer geringen Verfestigung tritt der Bruch ein. Die Unterschiede des Materialverhaltens bei tiefen Temperaturen zeigen sich ebenfalls in den Bruchbildern beider Klebstoffe.

Durch die Versteifung des Klebstoffes bei niedrigen Temperaturen steigt der Zugmodul deutlich an. Bei hohen Temperaturen fallen die Zugmoduln auf einen sehr geringen Wert ab. Die Schulterstäbe können bei geringer Kraft ohne sichtbare Veränderungen in der Struktur oder Oberfläche bis zum Anschlag an die Klimakammer gedehnt werden. Werden die Prüfkörper anschließend bei Raumtemperatur gelagert, gewinnen sie mit dem Abkühlen nahezu ihr ursprüngliches Verhalten wieder.

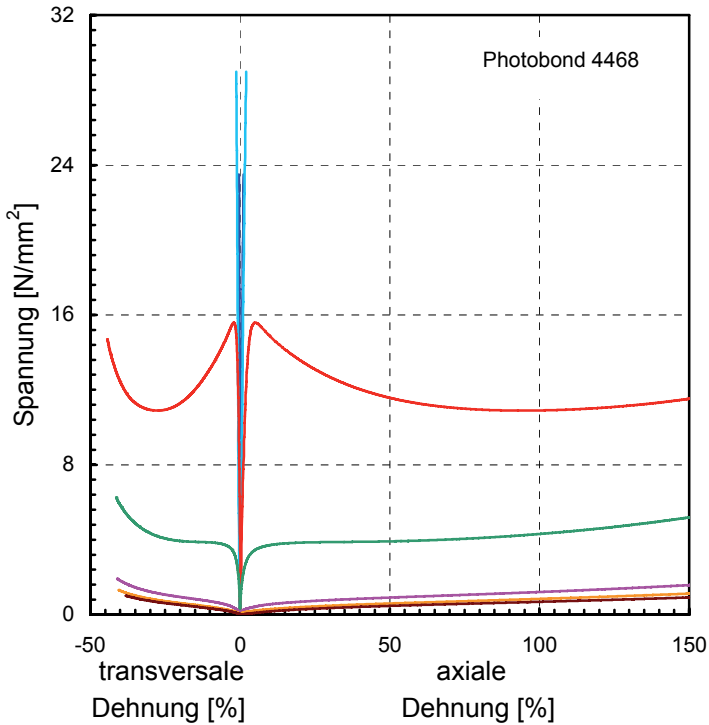


Bild 43 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei verschiedenen Temperaturen und einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min. Die Kurvenverläufe wurden bei Dehnungen von 150 % gekürzt.

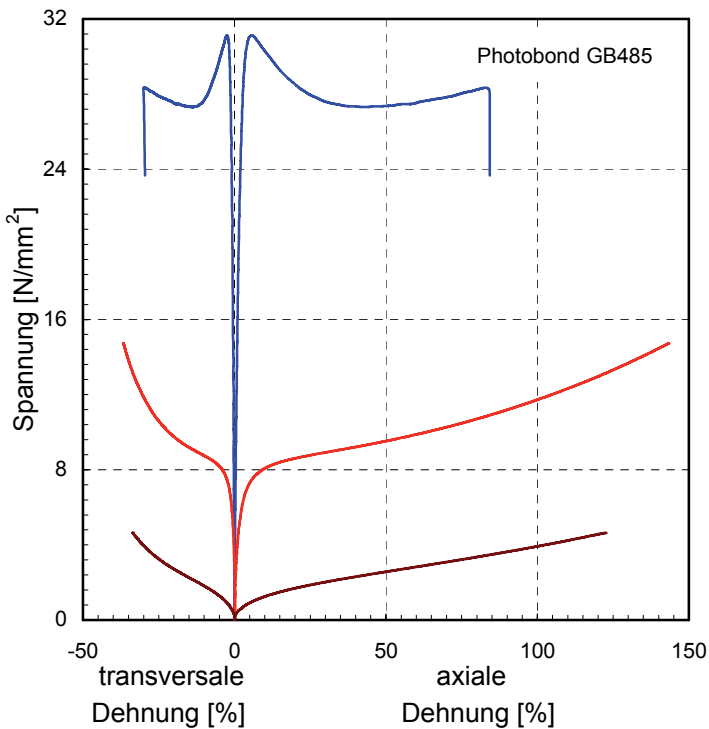


Bild 44 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei verschiedenen Temperaturen und einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min.

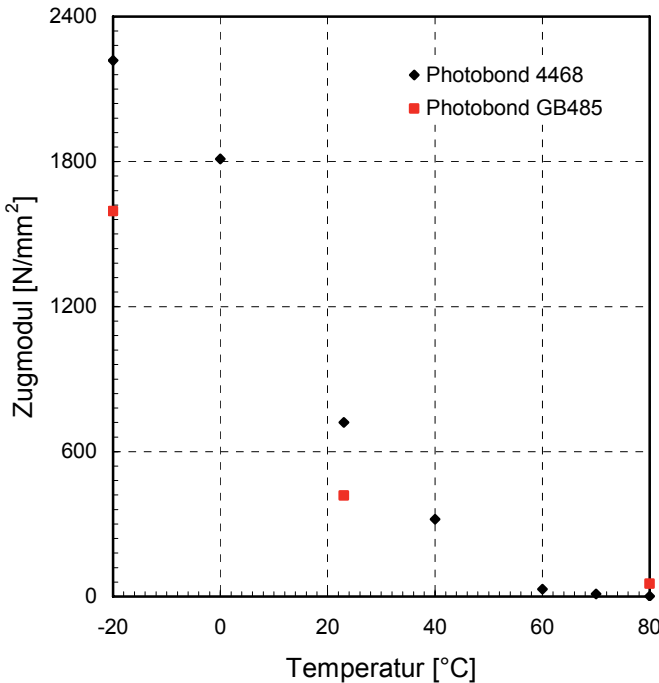


Bild 45 Zugmodul in Abhängigkeit der Temperatur bei einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min. Beide Klebstoffe verhalten sich bei tiefen Temperaturen steif, bei hohen Temperaturen weich. Das temperaturabhängige Verhalten ist beim Photobond 4468 stärker ausgeprägt.

Zur Erklärung des temperaturabhängigen Verhaltens dient die Glasübergangstemperatur T_g . Sie bezeichnet die Temperatur, bei der sich ein hartes Material in eine gummielastische Phase umwandelt. Unterhalb der Glasübergangstemperatur verhält sich das Material steif, da die Kettenbeweglichkeit der Polymere quasi eingefroren ist. Oberhalb der Glasübergangstemperatur können sich die Ketten frei bewegen, wodurch innerhalb eines Makromoleküls Platzwechselvorgänge stattfinden können. Dabei verhält sich das Material nachgiebig.

Die Angabe einer konkreten Glasübergangstemperatur kann leicht zu Missverständnissen führen, da die Umwandlung bei den meisten Materialien innerhalb eines Temperaturbereiches stattfindet. Die Spanne erstreckt sich über einen Bereich von etwa 50 K und wird durch den molekularen Aufbau des Polymers beeinflusst. Die Glasübergangstemperatur ist etwa als der Mittelwert dieses Bereiches zu verstehen.⁹⁴

⁹⁴ Vergleiche hierzu Kothe 2008, Seite 11.



Bild 46 Schulterstäbe aus dem Photobond 4468 nach dem Prüfen bei Temperaturen von +80 °C. Direkt nach der Prüfung waren sie sehr formbar. Anschließend verloren sie gleichzeitig mit der Wärme ihre Biegsamkeit.



Bild 47 Schulterstäbe aus dem Photobond 4468 nach Prüfung bei Temperaturen von -20 °C. Das spröde Verhalten endete mit einem schlagartigen Versagen.

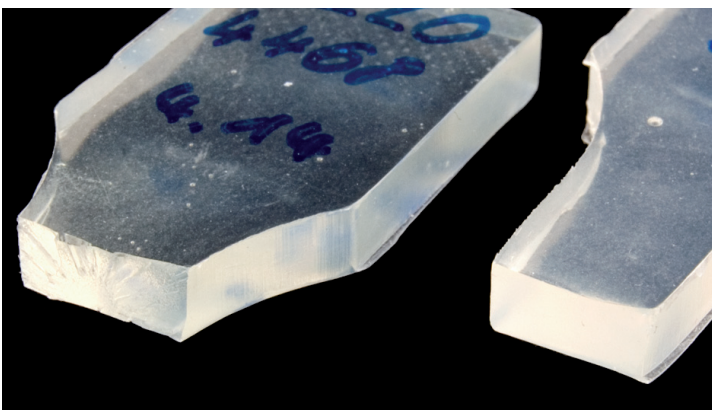


Bild 48 Typische Bruchbilder nach Prüfung bei -20 °C. Der Photobond 4468, links im Bild, zeigt einen Bruch ausgehend von einer kleinen Luftblase an der Oberfläche. Die Ausbreitung des Versagens scheint strahlenförmig vom Bruchursprung zu verlaufen. Der Photobond GB485, rechts, zeigt dagegen eine glatte Bruchfläche.

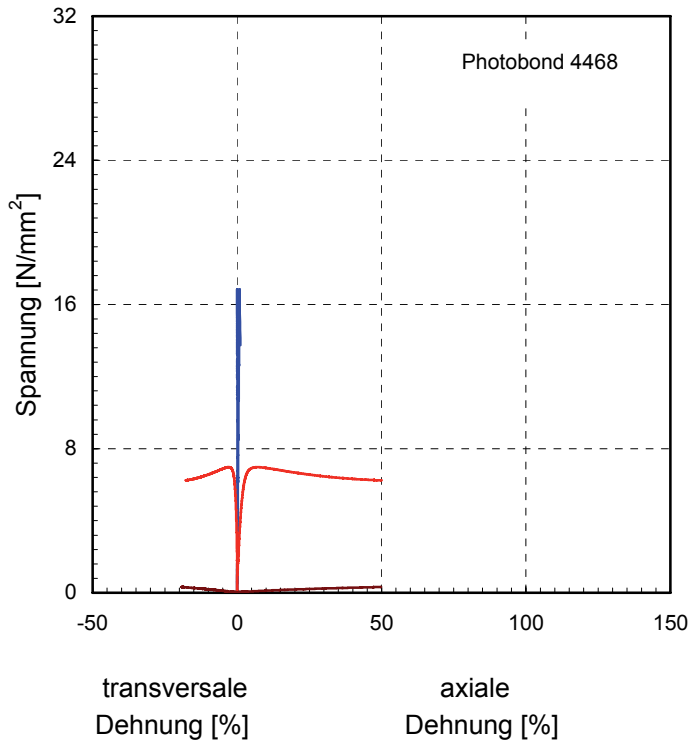


Bild 49 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei verschiedenen Temperaturen, Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min. Bei -20 °C versagten die Prüfkörper. Die Untersuchungen bei +80 °C wurden nach 50 Minuten abgebrochen.

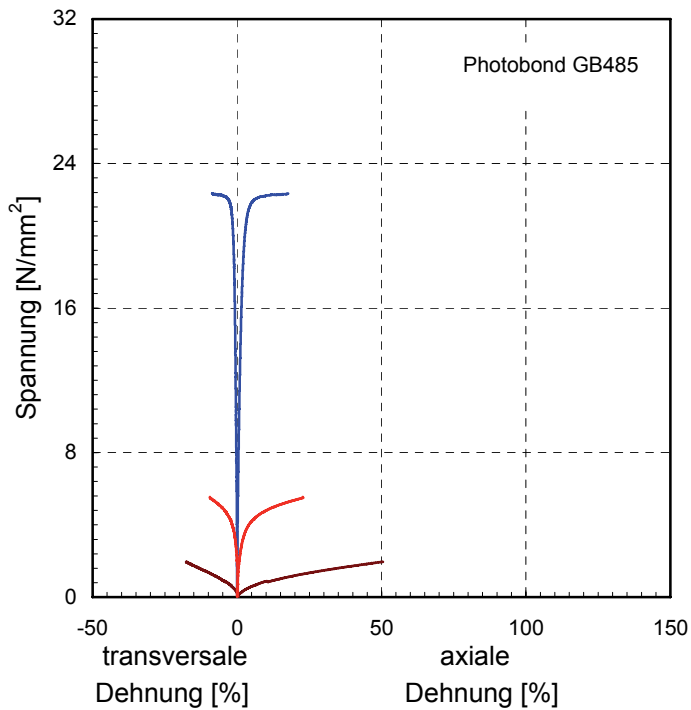


Bild 50 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei verschiedenen Temperaturen, Prüfgeschwindigkeit 1 mm/min. Bei -20 °C versagten die Prüfkörper. Die weiteren Untersuchungen wurden nach 30 beziehungsweise 50 Minuten abgebrochen.

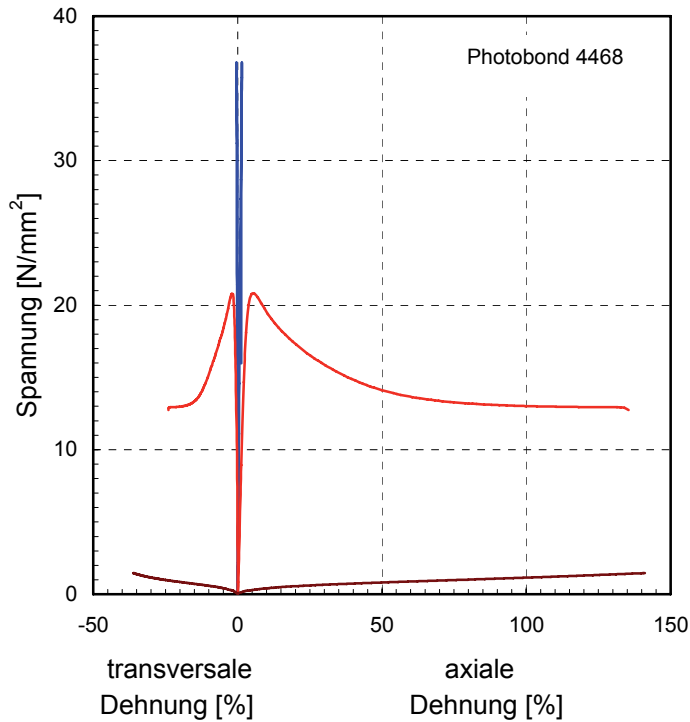


Bild 51 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei verschiedenen Temperaturen, Prüfgeschwindigkeit 500 mm/min.

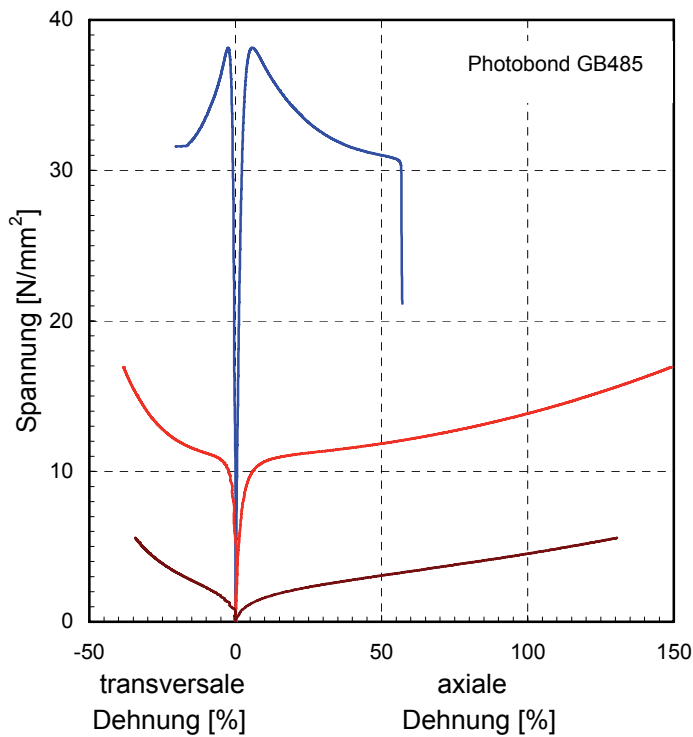


Bild 52 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei verschiedenen Temperaturen, Prüfgeschwindigkeit 500 mm/min. Auch hier zeigt der Klebstoff bei -20 °C nach dem linearen Anfangsbereich ein plastisches Verhalten.

Die Zusammenstellungen zeigen das temperatur- und geschwindigkeitsabhängige Verhalten beider Acrylatklebstoffe. Die Anfangssteigung in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung - durch den Zugmodul ausgedrückt - steigt mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit und mit abnehmenden Temperaturen. Bei beiden ist dabei die Abhängigkeit von der Temperatur im besonderen Maße entscheidend.

Prüftemperatur [°C]	Zugmodul [N/mm ²]		
	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]		
	1	50	500
-20	2202	2218	2572
±0		1811	
+23	298	720	887
+40		320	
+60		30	
+70		11	
+80	2	1	10

Tafel 4 Zugmodul für den Photobond 4468 in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit.

Betrachtet man die Ergebnisse über die gesamte Temperaturspanne von -20 °C bis +80 °C und die von ISO 527-1 zur Auswahl angebotenen Geschwindigkeiten, so treten bei Photobond 4468 Zugmoduln von 1 bis 2572 N/mm² auf.

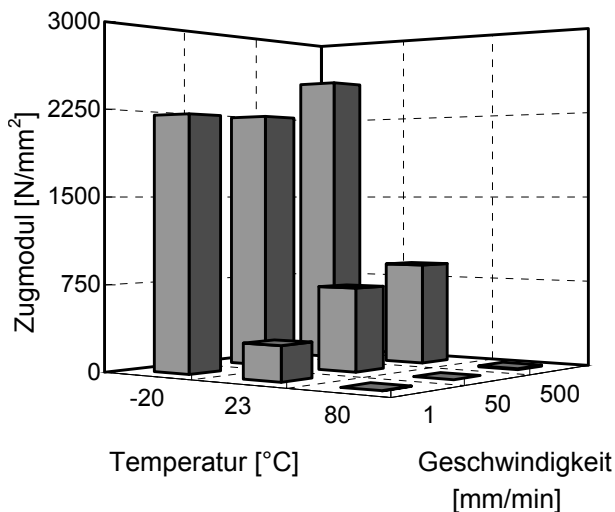


Bild 53 Zugmodul für den Photobond 4468 in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit.

Die Beeinflussung des Materialverhaltens durch die Parameter Temperatur und Geschwindigkeit wirkt sich beim Photobond GB485 in etwas abgeschwächter Intensität als beim Photobond 4468 aus. Für den Photobond GB485 ergeben sich über den gleichen Bereich Zugmoduln, die von 20 bis 2320 N/mm² reichen.

Bei Anwendung einer geklebten Verbindung mit den untersuchten Acrylaten unter wechselnder Temperaturbeanspruchung und unterschiedlicher Belastung sind Grenzwertuntersuchungen mit diesen Spannweiten erforderlich.⁹⁵

Prüftemperatur [°C]	Zugmodul [N/mm ²]		
	Prüfgeschwindigkeit [mm/min]		
	1	50	500
-20	1367	1595	2320
±0			
+23	287	418	487
+40			
+60			
+70			
+80	20	53	48

Tafel 5 Zugmodul für den Photobond GB485 in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit.

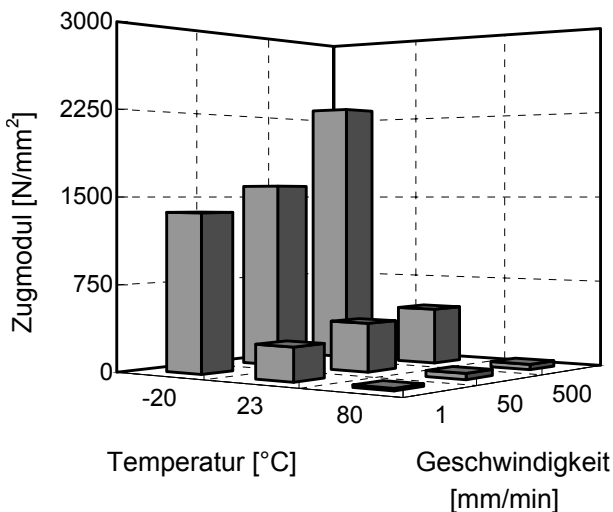


Bild 54 Zugmodul für den Photobond GB485 in Abhängigkeit von Temperatur und Prüfgeschwindigkeit.

⁹⁵ Schnee- und Windlasten können mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten auf die Konstruktion treffen. Vergleiche hierzu Wellershoff 2006.

7.6 Variation der Einlagerungsdauer

Da sich im Laufe der Bearbeitung immer wieder die Frage nach der Dauer der Einlagerungszeit stellte und diese nicht einheitlich gehandhabt wurde, sollte eine zusätzliche Untersuchung Klarheit verschaffen. Dabei wurden Schulterstäbe aus dem Photobond 4468 bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ für unterschiedliche Zeitspannen im Klimaschrank eingelagert. Beginnend mit einer Stunde wurden weiterhin Einlagerungszeiten von einem Tag und drei Tagen verglichen. Bei den hohen Temperaturen wurde des Weiteren eine gleichbleibende Luftfeuchte von 30 % eingestellt. Die Prüfungen erfolgten mit einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min.



Bild 55 Schulterstäbe aus Photobond 4468 im Klimaschrank bei $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die linken Prüfkörper lagerten bereits drei Tage. Im Unterschied zu den rechten, kurz vorher dazugelegten, zeigen sie eine Vergilbung.



Bild 56 Schulterstäbe aus Photobond 4468. Zum Fotografieren wurden sie kurzfristig aus der Klimalagerung bei $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ genommen. Es ist eine Gelbfärbung bei dem oberen, seit drei Tagen eingelagerten Prüfkörper zu erkennen. Der untere wurde eine Stunde lang klimatisiert.

Für beide Temperaturen zeigten sich nahezu keine Unterschiede, die auf eine Beeinflussung durch die Einlagerungsdauer schließen könnten. Die Kurven zeigen in etwa den gleichen Verlauf. Lediglich im Falle verlängerter Lagerung bei hohen Temperaturen zeichnet sich ein geringfügiger Anstieg in der aufzubringenden Spannung ab.

Die Klebstoffproben, die längere Zeit bei +80 °C lagerten, zeigten eine deutliche Vergilbung. Vor und nach Einlagerung in den Klimaschrank wurden die Prüfkörper gewogen. Dabei wurde bei einer dreitägigen Lagerung ein Gewichtsverlust von ungefähr 1 % festgestellt.

Weitere Versuche hierzu wurden vorerst zurückgestellt, da in der praktischen Anwendung im Bauwesen eine solch anhaltende Temperaturbeanspruchung in der Regel nicht auftritt.

Resultierend aus dieser Untersuchung wird für Untersuchungen an Substanzproben eine Konditionierung von 24 ± 4 h empfohlen. Mit dieser Vorgehensweise folgt man den Angaben der ETAG 002-1. Wird dieser Zeitraum hingegen unterschritten, sind die Auswirkungen - zumindest bei dem untersuchten Photobond 4468 - vernachlässigbar. Eine verlängerte Temperaturbelastung erzeugt Veränderungen im Material, die eine Vergilbung mit gleichzeitiger Gewichtsabnahme verursacht. Werden im Anwendungsfall solche Anforderungen gestellt, sind vertiefende Untersuchungen notwendig.

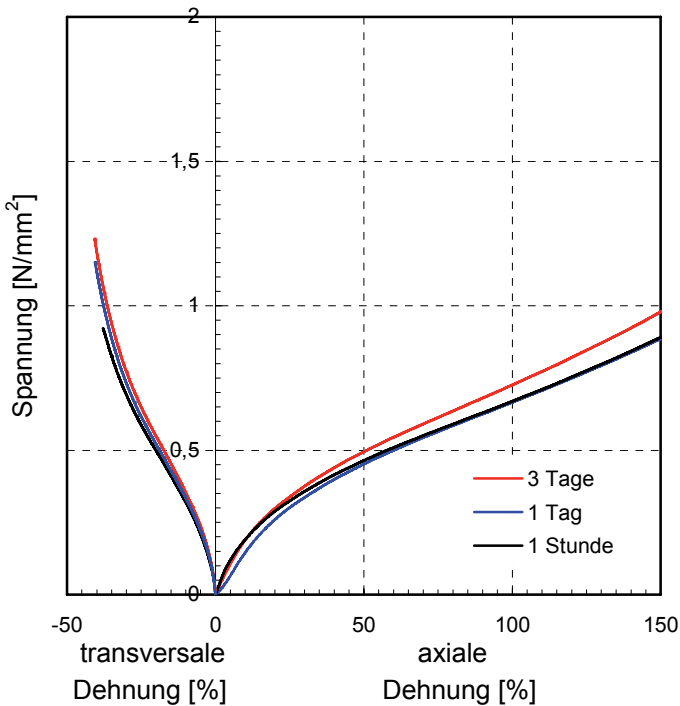


Bild 57 Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Schulterstäbe aus Photobond 4468, Prüfgeschwindigkeit 50 mm/min. Jeweils fünf Prüfkörper wurden für 3 Tage, 1 Tag und 1 Stunde bei +80 °C und 30 % Luftfeuchte eingelagert und bei dieser Temperatur geprüft. Es waren nahezu keine Unterschiede erkennbar, die auf eine Auswirkung der Einlagerungszeiten hinweisen. Lediglich bei drei Tagen Lagerung ist ein geringfügiger Anstieg der Spannung bei gleichbleibender Dehnung zu bemerken.

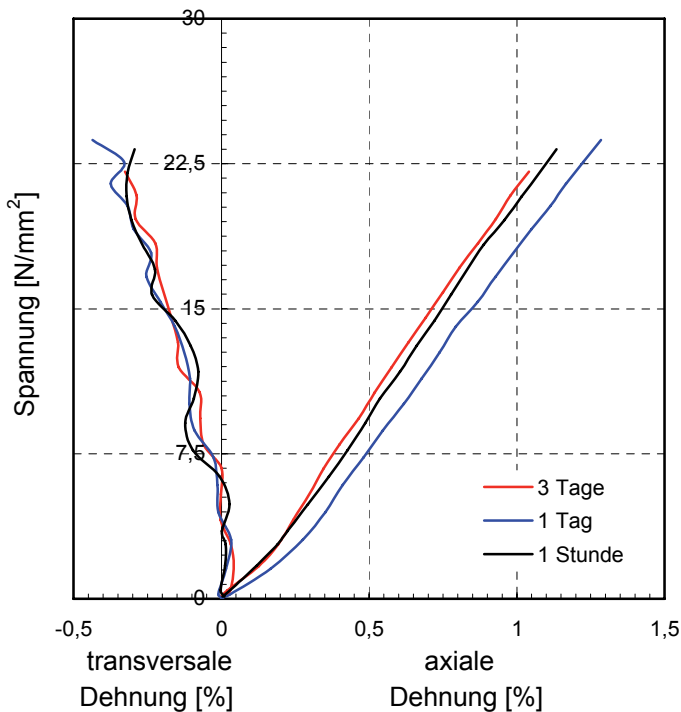


Bild 58 Spannungs-Dehnungs-Beziehung für Schulterstäbe aus Photobond 4468, Prüfgeschwindigkeit 50 mm/min. Jeweils fünf Prüfkörper wurden für 3 Tage, 1 Tag und 1 Stunde bei -20 °C eingelagert und bei dieser Temperatur geprüft. Es waren keine Unterschiede zu erkennen, die auf einen Einfluss der Einlagerungsdauer deuten.

7.7 Dynamisch-Mechanische Analyse

Die dynamisch-mechanische Analyse (DMA) ist ein thermisches Verfahren zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften eines Materials. Dabei wird ein Prüfkörper einer sinusförmigen Schwingung unterworfen. Bei variierender Frequenz und beim Durchlaufen eines großen Temperaturbereiches können Aussagen zum Werkstoffverhalten und der Glasübergangstemperatur erstellt werden.⁹⁶

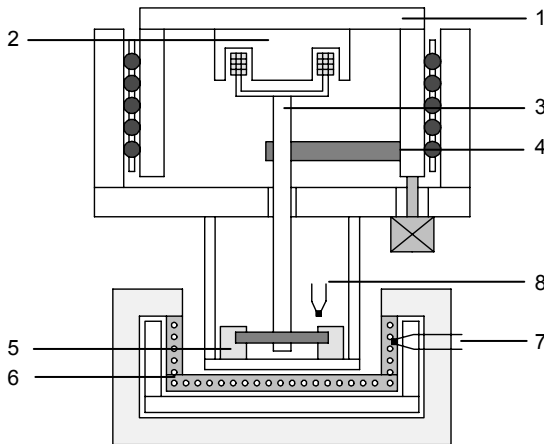


Bild 59 Schematischer Aufbau des dynamisch-mechanischen Analysators.
 1 Schrittmotor
 2 Schwingungserreger
 3 Fühlstempel
 4 Wegsensor
 5 Probenhalter
 6 Temperiereinrichtung
 7 Regelthermoelement
 8 Probenthermoelement

Aus dem zeitlich versetzten Verhältnis zwischen Kraft und Verformung ergibt sich die Phasenverschiebung δ sowie ein komplexer Modul E^* . Dieser lässt sich in den Speichermodul und Verlustmodul aufteilen. Der Speichermodul E' formuliert den Teil der Energie, der vom System gespeichert wird und weiterhin zur Verfügung steht.

$$E' = E^* \cdot \cos \delta$$

Gleichung 3

Dagegen wird durch den Verlustmodul E'' der Teil der Energie beschrieben, der in Wärme umgewandelt und abgegeben wird.

$$E'' = E^* \cdot \sin \delta$$

Gleichung 4

⁹⁶ Ausführlichere Erläuterungen zu dieser Analysemethode vergleiche Grellmann 2005, Seite 95 ff. und ISO 6721.

Das Verhältnis dieser beiden Anteile zueinander wird durch den Verlustfaktor $\tan \delta$ beschrieben.

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'}$$

Gleichung 5

Aus dem Verlauf der Kurven können Rückschlüsse auf das Materialverhalten gezogen werden. Besonders aussagekräftig ist diese Methode, um die Glasübergangstemperatur zu bestimmen. Die Änderungen der Materialeigenschaften in diesem Bereich werden in den Kurvenverläufen besonders deutlich.

Beide Acrylatklebstoffe wurden einer dynamisch-mechanischen Analyse unterworfen. Dafür wurde eine dünne Klebstoffprobe in eine Zugvorrichtung eingespannt. Eine dynamische Kraft in variierenden Frequenzen wird über die Bewegung der oberen Halterung aufgebracht. Eine statische Last hält die Probe unter einer Mindestspannung.

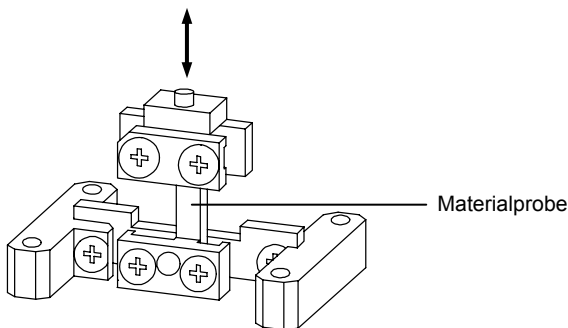


Bild 60 Schema der Probenhalterung auf Zug, die für die untersuchten Klebstoffe empfohlen wird.

Die Glasübergangstemperatur als der Mittelwert des Erweichungsbereiches wird in der Regel im Maximum des Verlustfaktors $\tan \delta$ bestimmt. Im Vergleich der Werte für beide Klebstoffe bestätigt sich das ausgeprägte temperatur- und geschwindigkeitsabhängige Verhalten des Acrylatklebstoffes Photobonds 4468. Die Maximalwerte des Verlustfaktors sind frequenzabhängig und weisen höhere Unterschiede im Betrag sowie in der Temperatur auf. Die Glasübergangstemperatur liegt beim Photobond GB485 in Größenordnungen von 5 °C bis 15 °C niedriger als beim Photobond 4468.

Frequenz	Glasübergangstemperatur [°C]	
	Photobond 4468	Photobond GB485
0,1 Hz	52,0	47,6
0,5 Hz	59,1	51,6
1,0 Hz	62,6	52,6
5,0 Hz	71,7	57,6
10,0 Hz	75,8	60,6

Tafel 6 Glasübergangstemperatur für den Photobond 4468 und den Photobond GB485 in Abhängigkeit der Frequenz. Die Ermittlung erfolgte mit der dynamisch-mechanischen Analyse (DMA).

Je höher der Verlustfaktor $\tan \delta$, umso höher ist der Verlustmodul E'' . Dies bedeutet im direkten Vergleich beider Klebstoffe, dass beim Photobond 4468 ab dem Erweichungsbereich ein größerer Teil der Energie in Wärme umgewandelt wird und nicht mehr zur Verfügung steht. Ab der Glasübergangstemperatur ist beim Photobond 4468 der plastische Anteil höher als beim Photobond GB485.

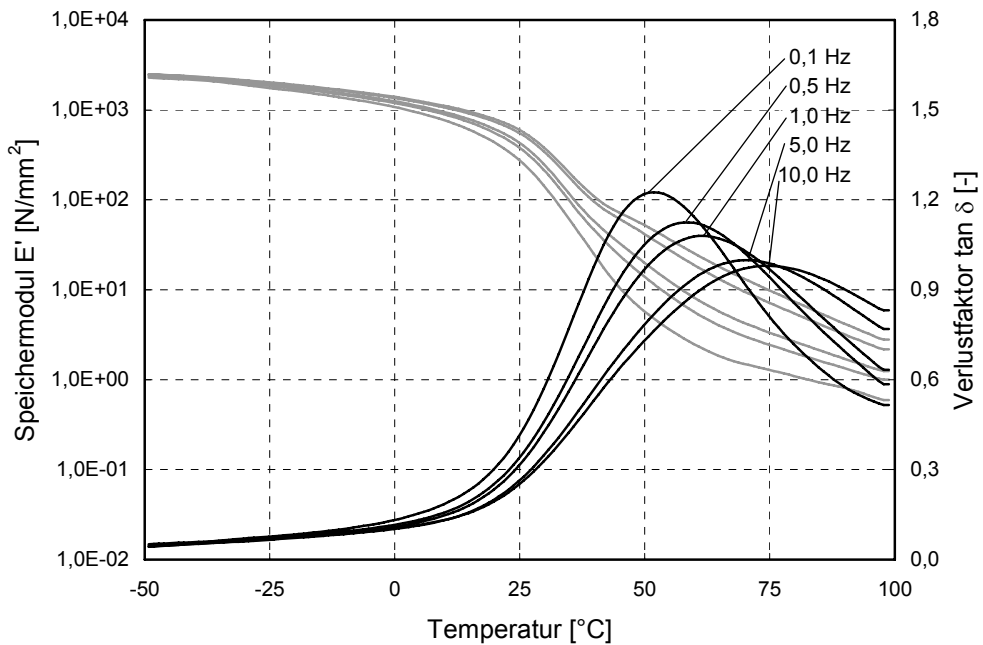


Bild 61 Ergebnisse der DMA-Messung für den Photobond 4468 mit Darstellung des Speichermoduls (grau) und des Verlustfaktors (schwarz).

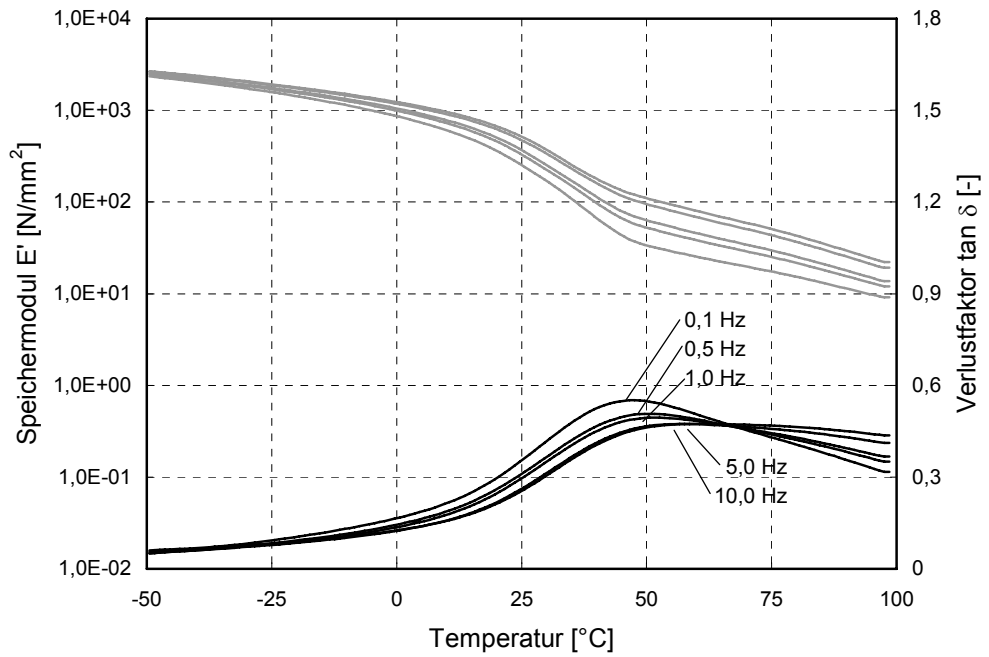


Bild 62 Ergebnisse der DMA-Messung für den Photobond GB485 mit Darstellung des Speichermoduls (grau) und des Verlustfaktors (schwarz).

8 Kennwertermittlung an der Rohrprobe

8.1 Grundlagen

Für die Ermittlung der Materialkennwerte an in-situ-Prüfkörpern bietet sich die Rohrprobe an. Bei den häufig eingesetzten einschnittig überlappenden Verbindungen, wie den Druckscherprüfkörpern, entsteht ein ungleichförmiger Spannungsverlauf.⁹⁷ Im Gegensatz dazu wird bei Verwendung von ringförmigen und geschlossenen Querschnitten ein nahezu gleichmäßiger Spannungsverlauf erzeugt. Die von diesen geometrischen Bedingungen ausgehend entwickelte Rohrprobe liefert bei Zug- und Torsionsbelastung aussagekräftige Kennwerte.⁹⁸ Zusätzlich zur Ermittlung des Elastizitätsmoduls und des Schubmoduls kann die Querdehnzahl aus diesen Versuchen ermittelt werden.

Bei Einleitung einer Torsionsbeanspruchung M_t wird in der Klebfuge eine nahezu gleichmäßige Schubspannung τ erzeugt. Bei Zug- oder Druckbelastung F in Probenlängsrichtung wird auf die Fläche A eine gleichmäßig verteilte Zug- oder Druckspannung σ hervorgerufen.

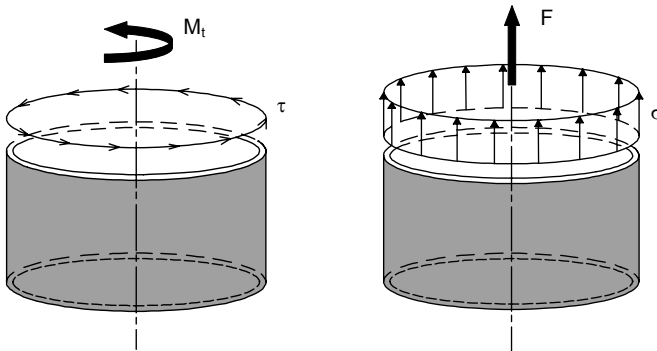


Bild 63 Bei Torsionsbelastung des Hohlzylinders bildet sich eine gleichmäßige Verteilung der Schubspannung τ aus. Bei axialer Belastung des Hohlzylinders wird eine gleichmäßige Verteilung der Zug- oder Druckspannung σ erzeugt.

$$\tau = \frac{M_t}{W_p}$$

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Gleichung 7 und 8

⁹⁷ Vergleiche hierzu Kapitel 5.2.

⁹⁸ Vergleiche hierzu Schlimmer 2004 a und b, Barthel 2007, Bieker 2006 und Bornemann 2004.

Die Kennwertermittlung an der Rohrprobe wird entsprechend den vorangegangenen Kapiteln für die beiden Acrylatklebstoffe Photobond 4468 und Photobond GB485 durchgeführt. Beide Klebstoffe werden für eine Schichtdicke von 0,5 mm bei drei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Die Temperaturen richten sich nach den Forderungen der ETAG 002-1. Je Kombination werden drei Proben geprüft. Die Zug- und Torsionsversuche wurden am Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig durchgeführt.

8.2 Probengeometrie und Herstellung

Der Versuchsaufbau wurde in Anlehnung an EN 14869-1 gewählt.⁹⁹ Zur Ermittlung von Materialkennwerten für Glas-Metall-Klebungen musste der Aufbau modifiziert werden.

Eine runde Scheibe aus Floatglas mit einem mittigen Loch zur Befestigung der Justiervorrichtung wurde beidseitig mit je einem Hohlprofil gefügt. Die zu untersuchende strahlungshärtende Acrylatklebung wurde - wie erforderlich - ringförmig ausgeführt. Da diese zuerst geklebt wurde, konnte die Bestrahlung zur Aushärtung senkrecht durch das Glas erfolgen.

Für die zweite Klebung, die so genannte Hilfsklebung, wurde ein Klebstoff eingesetzt, der ohne Bestrahlung aushärten konnte. Diese Hilfsklebung musste höhere Festigkeitswerte aufweisen als die Acrylatklebung, damit das Versagen an dieser Stelle nicht zuerst auftritt und die Versuche vorzeitig abbrechen. Erreicht wurde dies durch den Einsatz eines Epoxidharzklebstoffs. Zum leichteren Applizieren und zum

⁹⁹ In EN 14869-1 ist das Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf geklebter Hohlzylinder beschrieben. Der Aufbau und die Geometrie der beschriebenen Rohrprobe sind für Anwendungen von Metallklebungen geeignet. Zwei Holzzylinder werden mit einer Stumpfklebung gefügt und in eine Torsionsprüfmaschine eingespannt. Um eine kraftschlüssige Einspannung zu gewährleisten, ist das obere und untere Ende des Prüfkörpers verstärkt auszuführen, beziehungsweise ist dort eine Verstärkung einzufügen. Ein Sensor für Verschiebungen ist von außen ringförmig und so nah wie möglich an der Klebschicht anzubringen, um die Verschiebung der beiden Fügeteile zueinander zu messen. Die Probe wird bis zum Bruch gefahren. Zeigt sich an dem Bruchbild, dass die Klebung unvollständig war, sind diese Ergebnisse zu verwerfen und die Prüfung zu wiederholen.

Erreichen höherer Versagenskräfte wurde diese Klebung flächig an die Stirnseite des Rohrprofils ausgeführt.

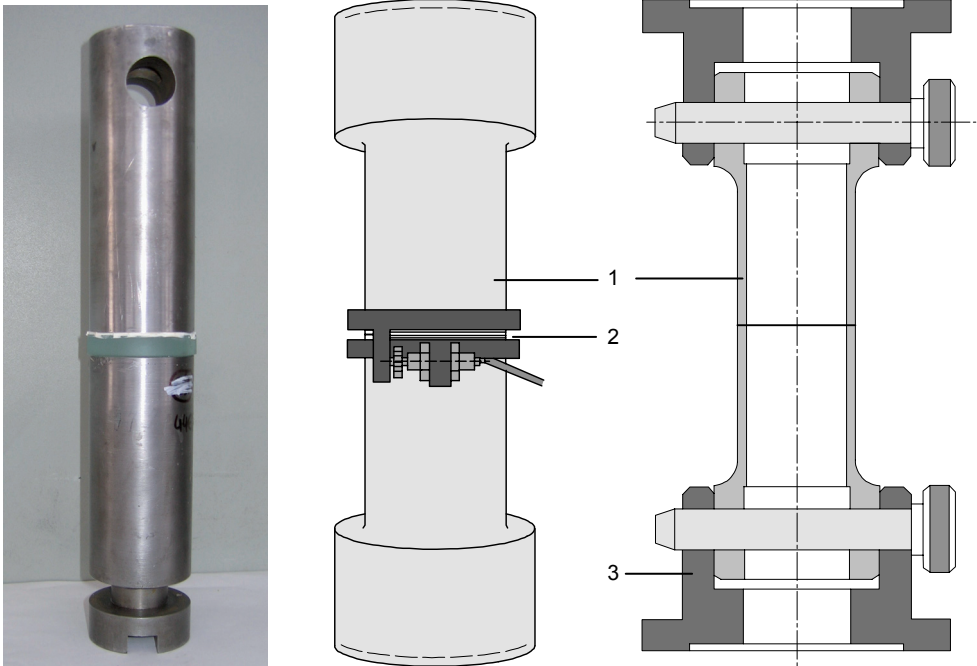


Bild 64 Links zu sehen ist die fertige Rohrprobe für Glas-Metall-Klebung. Die Rohrprobe für Metallklebung nach EN 14869-1 in Ansicht und Schnitt ist rechts daneben.
 1 Rohrprobe
 2 Verschiebungssensoren
 3 Einspannung in Prüfmaschine

Verwendet werden Hohlzylinder mit Innen- und Außendurchmesser von $d_i = 45 \text{ mm}$ und $d_a = 54 \text{ mm}$, die die Bedingungen der EN 14869-1 erfüllen.¹⁰⁰ Die Klebstoffdicke von $d_k = 0,50 \text{ mm}$ bei einer Breite von $4,5 \text{ mm}$ liegt knapp außerhalb des empfohlenen Verhältnisses.¹⁰¹ Erfahrungen aus den bisherigen Untersuchungen erlaubten jedoch diese Abweichung.

¹⁰⁰ EN 14869-1, Tabelle 1 empfiehlt Rohrprofile mit Außen- und Innendurchmesser in drei unterschiedlichen Abmessungen. Zwischengrößen können verwendet werden, wenn der Innendurchmesser 80 % des Außendurchmessers beträgt.

¹⁰¹ Klebstoffdicken sollen vorzugsweise mit $0,2 \text{ mm}$ ausgeführt werden, für spezielle Klebstoffe jedoch ist eine Spannweite von $0,05 \text{ mm}$ bis $0,5 \text{ mm}$ zugelassen. Zusätzlich wird verlangt, dass die Klebstoffschicht mindestens zehnmals breiter als dick sein soll. Vergleiche hierzu EN 14869-1, Abschnitt 7.1.4, Seite 7.

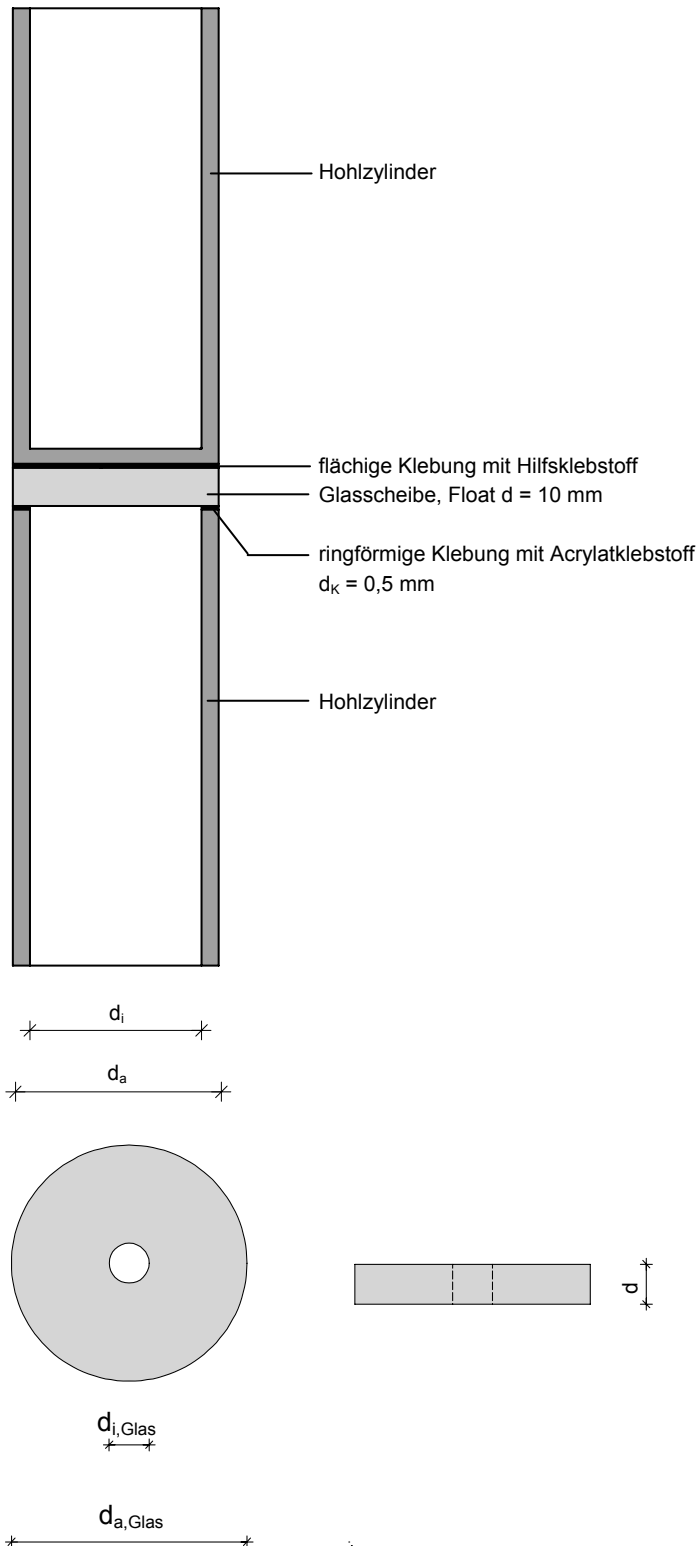


Bild 65 Schematische Darstellung der Rohrprobe für Glas-Metall-Klebungen im Schnitt. Die kreisförmige Scheibe aus Floatglas wird beidseitig an die Hohlzylinder geklebt. Die zu untersuchende Acrylatklebung wird ringförmig ausgeführt. Der Hilfsklebstoff, der keinen Einfluss auf die Versuchsergebnisse hat, wird flächig aufgebracht. Um einen exakten Aufbau zu gewährleisten, wird eine Justiervorrichtung aus Teflon - hier nicht dargestellt - verwendet.

Bild 66 Glasscheibe aus Floatglas in Draufsicht und Schnitt zur Weiterverwendung in der Rohrprobe. Die Glasscheiben wurden mit einer Wasserstrahlanlage geschnitten, eine Bearbeitung der Kanten war nicht erforderlich.

Mit Hilfe einer UV-Lampe wurde bei jeder Glasscheibe die Bad- und Atmosphärenseite unterschieden. Um gleiche Ausgangsvoraussetzungen zu erhalten, sollten die zu untersuchenden Acrylatklebstoffe bei allen Proben auf die Atmosphärenseite aufgebracht werden.¹⁰² Die Metalloberflächen und Glasscheiben wurden mit dem herstellerseitig empfohlenen Reiniger DELOTHEN® EP gereinigt.

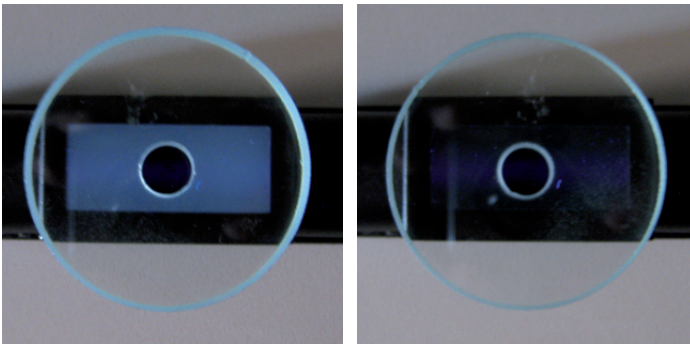


Bild 67 Unterscheidung der Bad- und Atmosphärenseite mittels einer UV-Lampe. Wurde die UV-Lampe auf die Badseite gehalten, erschien ein milchiges Licht (links), bei der Atmosphärenseite war ein klares, hier schwaches Licht zu sehen (rechts).

Zur Herstellung wurde eine Fügevorrichtung verwendet, die für gängige Rohrproben entwickelt wurde. Dabei wurde das untere Rohr in die Fügevorrichtung eingespannt. Der flüssige Klebstoff wurde auf den ringförmigen Rand des Rohres aufgebracht. Ein Ring aus PTFE (Polytetrafluorethylen, umgangssprachlich Teflon genannt) begrenzte die Klebfuge nach innen. Die Fugendicke wurde über Glasperlen eingestellt.¹⁰³ Da die Glasperlen eine Körnung von 0,42 bis 0,59 mm aufwiesen, wurde mit einem Sieb mit Maschenweite 0,5 mm die Spannbreite reduziert. Mehrere Glasperlen wurden in den flüssigen Klebstoff eingelassen¹⁰⁴, dadurch stellte sich eine Klebstoffdicke nahe 0,5 mm ein. Die Glasscheibe wurde zentrisch aufgelegt. Zur Justierung diente eine Konstruktion aus Teflonring und Schraube, die ebenfalls

¹⁰² Durch das beim Herstellungsprozess eindiffundierte Zinn werden geringere Festigkeiten beim Kleben der Badseite als beim Kleben der Atmosphärenseite erzielt. Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 103.

¹⁰³ Nach EN 14869-1, Abschnitt 7.1.4, Seite 8 kann die Klebstoffdicke ebenfalls durch eine ringförmige, dünne Aufkantung auf der Außenseite des Rohres eingestellt werden, die nach dem Aushärten durch Abschleifen zu entfernen ist. Durch den Einsatz des Materials Glas schied diese Lösung jedoch aus. Da hier lediglich Zug- und Schubbelastung und keine Druckkräfte in die Klebfuge eingeleitet wurden, konnten Glasperlen als Abstandhalter gewählt werden, die in Ringrichtung nur eine geringe Störung der Klebung erzeugen.

¹⁰⁴ Weiterführende Untersuchungen sollten den Einfluss der Glasperlen auf die Festigkeit beschreiben.

die Klebfuge nach innen begrenzte, ohne dass der Klebstoff am Teflon haftete. Nach dem Ausrichten der Glasscheibe erfolgte die Aushärtung mit einer UV-Lampe über einen Zeitraum von 40 Sekunden. Diese wurde über die Konstruktion gestellt, so dass die Strahlung senkrecht durch das Glas fallen konnte.

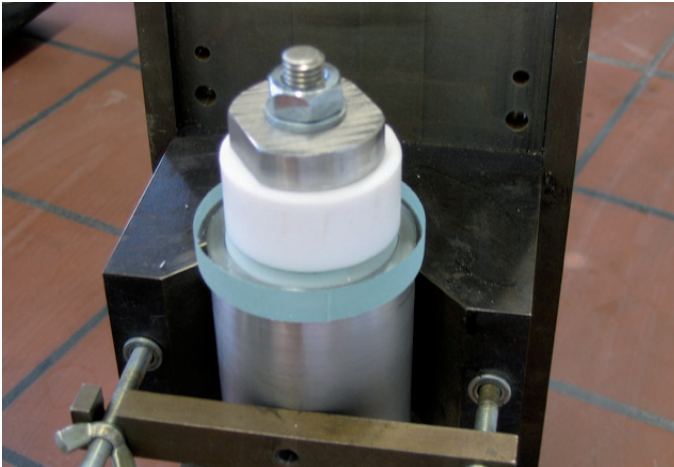


Bild 68 Rohrprofil mit aufgelegter Glasscheibe und Justiervorrichtung. Zwischen Rohr und Glasscheibe ist der Acrylatklebstoff mit eingelegten Glasperlen zur Einstellung der Schichtdicke aufgebracht.



Bild 69 Aushärten der Acrylatklebung mit einer UV-Lampe. Bei Bestrahlung von oben wird innerhalb von 40 Sekunden die Endfestigkeit erzielt.

Die obere flächige Klebung war ausschließlich dafür erforderlich, eine Verbindung zum zweiten Hohlzylinder herzu-

stellen, der in die Prüfmaschine eingespannt werden konnte. Dafür musste diese Klebung höhere Festigkeiten als die Acrylatklebung aufweisen, um nicht frühzeitig zu versagen und die Versuche abubrechen. Für diese sogenannte Hilfsklebung wurde der einkomponentige Epoxidharzklebstoff Araldite® 2020 der Firma Huntsman Advanced Materials verwendet.¹⁰⁵ Die Klebschichtdicke wurde mit 0,75 mm ausgeführt. Beschleunigt wurde die Aushärtung des Klebstoffes über eine induktive Wärmezufuhr mit etwa +70 °C über einen Zeitraum von 1,5 Stunden. Diese kurzzeitige Erhöhung der Temperatur, die mit Verzögerung auch auf die Acrylatklebung einwirkte, hatte laut Rücksprache mit dem Hersteller keinen Einfluss auf deren Festigkeit nach dem Abkühlen. Für die bei Temperaturen von +80 °C geprüften Rohrproben wurde der wärmebeständigere Klebstoff Scotch Weld® 9323 der Firma 3M, ein zweikomponentiger Epoxidharzklebstoff, verwendet.¹⁰⁶

8.3 Versuchsdurchführung

Zur Durchführung der Versuche wurde die Zug-Druck-Torsions-Maschine der Firma Instron verwendet. Diese Maschine kann Zug- und Druckbelastung in axialer Richtung und getrennt beziehungsweise gleichzeitig eine Torsionsbelastung aufbringen. Zur Verformungsmessung wurden induktive Wegaufnehmer eingesetzt, die nahe der ringförmigen Klebfuge saßen. Die Hilfsklebung lag außerhalb des Messbereiches und hatte keinen Einfluss auf die gemessenen Werte.

Die Verformung wurde mit Hilfe von Verschiebungssensoren, die ringförmig am Rohr befestigt wurden, gemessen. Der untere Ring dieser Konstruktion wurde über Befestigungsschrauben auf dem Metallrohr befestigt. Sie bildeten den relativen Nullpunkt der Messung.¹⁰⁷ Am oberen Ring befanden sich drei Aufnehmerpunkte. Zwei sich gegenüber befindende Punkte dienten zur Messung der Verformung in

¹⁰⁵ Datenblatt hierzu Huntsman 2020.

¹⁰⁶ Datenblatt hierzu 3M 9323.

¹⁰⁷ Die am Rohr angebrachten Messpunkte bewegen sich bei der Versuchsdurchführung ebenfalls mit. Wichtig für die Auswertung ist jedoch nicht der absolut zurückgelegte Weg der Aufnehmerpunkte, sondern die relative Verschiebung zueinander.

axialer Richtung, der dritte nahm die Verformung in Ringrichtung auf. Die Verschiebung der Ringe zueinander, sowohl in radialer als auch in axialer Richtung, konnte nun über Wirbelstromsensoren - einer speziellen Art von induktiven Wegaufnehmern - in Abhängigkeit von den eingeleiteten Kräften gemessen werden.

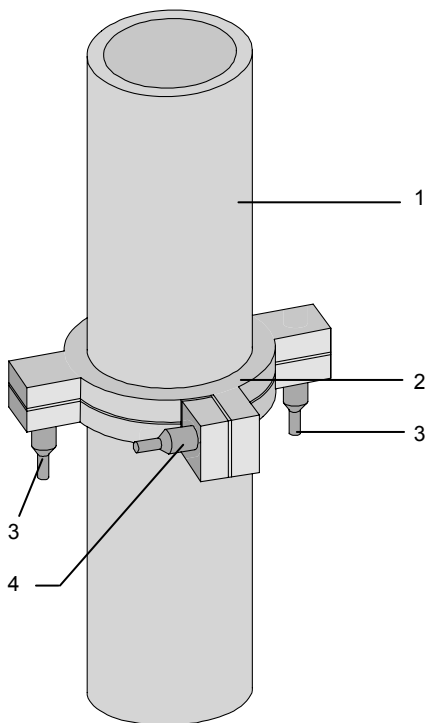


Bild 70 Schematische Darstellung der Rohrprobe (1) mit Verformungsmesser (2). Die Glasscheibe liegt verdeckt hinter der aufgesetzten Vorrichtung. Der Verformungsmesser ist so auf der Rohrprobe angeordnet, dass er die Verformung der Acrylatklebung aufnehmen kann. Die beiden gegenüberliegenden Sensoren (3) messen die Verformung in axialer Richtung, der dritte Sensor (4) misst die Verformung in Ringrichtung.

Die Zugversuche wurden mit einer konstanten Dehnungsgeschwindigkeit, die Torsionsversuche mit einer konstanten Gleitungsgeschwindigkeit bis zum Versagen gefahren.¹⁰⁸

¹⁰⁸ EN 14869-1 empfiehlt für die Torsionsversuche Schergeschwindigkeiten von $d\gamma/dt = 0,005 \text{ s}^{-1}$ bis $0,02 \text{ s}^{-1}$. Damit lag die gewählte Geschwindigkeit außerhalb des empfohlenen Bereichs. Allerdings sind diese Einstellungen am Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig erprobt und wurden deshalb auch bei diesen Untersuchungen angewendet.

	Dehnungs- geschwindigkeit $d\varepsilon/dt$	Gleitungs- geschwindigkeit $d\gamma/dt$
Zugversuch	$0,001 \text{ s}^{-1}$	0 s^{-1}
Torsionsversuch	0 s^{-1}	$0,002 \text{ s}^{-1}$

Tafel 7 Einstellungen der Versuchsdurchführung für Zug- und Torsionsversuch.

Die Rohrproben versagten größtenteils adhäsiv¹⁰⁹ auf der Metalloberfläche. Durch die Befestigung der ringförmigen Konstruktion zur Verformungsmessung war in einigen Fällen jedoch Glasbruch zu verzeichnen. Für weitere Versuche ist eine modifizierte Variante sinnvoll, um das Versagen des Glases durch eingeleitete Kerbkkräfte zu verringern.



Bild 71 In die Prüfmaschine eingespannte Rohrprobe. Für die Versuche bei Temperaturen von -20 °C und $+80 \text{ °C}$ wird eine Temperierkammer um die Apparatur geschoben, um auch während der Versuchsdurchführung eine konstante Temperaturbelastung sicherzustellen. Die Klebfuge ist durch die ringförmige Konstruktion zur Verformungsmessung verdeckt. Der obere Teil des Rings sitzt auf dem Rand der Glasscheibe, der untere knapp unterhalb der Klebung auf dem Hohlprofil.

¹⁰⁹ Bei einem Adhäsionsbruch gemäß ISO 10365 löst sich der Klebstoff von dem Fügeteil. Ein Kohäsionsbruch liegt vor, wenn das Versagen im Klebstoff auftritt. Von einem Mischbruch spricht man bei kombiniertem Adhäsions- und Kohäsionsversagen. Bei einem Fügeteilbruch geht der Bruch vom Versagen eines Fügeteils aus, der Klebstoff und der Verbund bleiben intakt. Der substratnahe spezielle Kohäsionsbruch geht von einem Versagen in der Grenzschicht aus. Er ist nur mit Hilfe eines hochauflösenden Mikroskops erkennbar. Vergleiche Habenicht 2006, Seite 372 ff. und ISO 10365.

8.3.1 Ermittlung der Dehnung

Da die gemessene Verformung unter Belastung sich aus der Verformung der Klebschicht und der Fügeiteile zusammensetzt, ist eine separate Berechnung zur Aufspaltung der Anteile erforderlich. Obwohl die Materialien Glas und Metall um ein Vielfaches steifer sind als der Klebstoff, wurde die Fügeiteilverformung berücksichtigt, da im Vergleich zu der Klebschichtdicke mit 0,5 mm der Abstand zwischen den beiden Messfühlern mit 10 mm relativ groß war.¹¹⁰

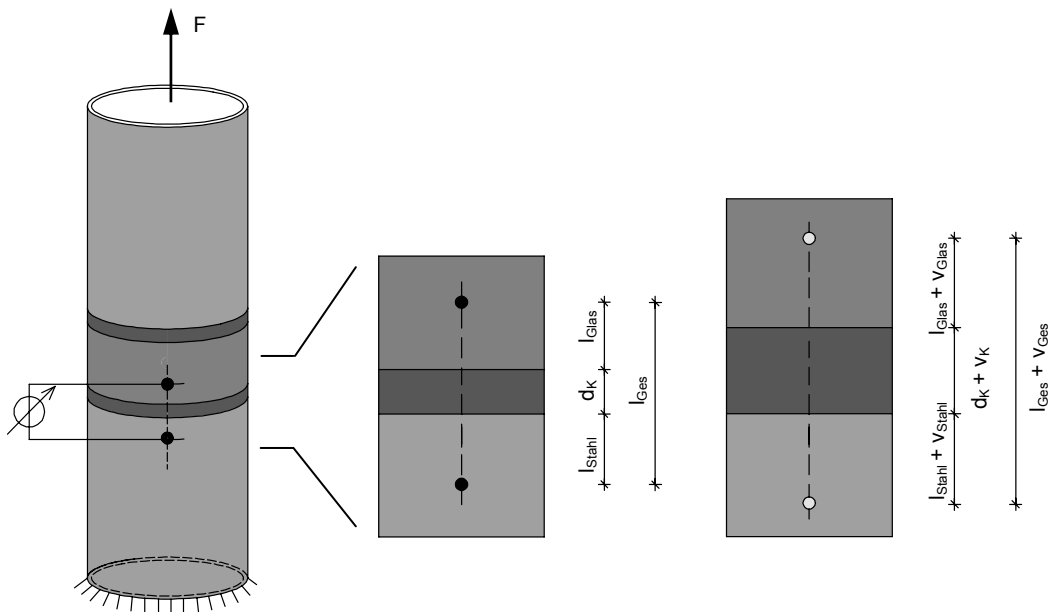


Bild 72 Schematische Darstellung der Verformung bei Zugbelastung. In der linken Skizze sind die Verformungsmesser zu sehen, die nahe an der zu untersuchenden Klebfuge sitzen. In der mittleren Zeichnung ist der Ausgangszustand (schwarze Punkte), rechts der Zustand nach Aufbringen der Zugbelastung (weiße Punkte) dargestellt.

¹¹⁰ Die nachfolgenden Auswertungen sind angelehnt an Barthel 2007, Seite 33 ff., Bornemann 2004, Seite 40 ff. und Schlimmer 2004.

Während der Versuche wurde die Zugkraft F mit dem dazu-gehörigen Verformungsweg v_{Ges} aufgenommen. Die gemessene Verformung setzte sich aus der Verformung der Klebfuge und der Verformung der Fügeteile Stahl und Glas zusammen.

$$v_{\text{Ges}} = v_{\text{Stahl}} + v_K + v_{\text{Glas}}$$

Gleichung 9

Die Verformungen der Fügeteile v_{Stahl} und v_{Glas} konnten aus der gemessenen Spannung und den bekannten Werten der Anfangslängen sowie aus den materialeigenen Elastizitätsmoduln berechnet werden. Für das Fügeteil aus Stahl war die Berechnung der Verformung mit den Abmessungen des Holzyinders zu führen.

$$v_{\text{Stahl}} = \frac{\sigma}{E_{\text{Stahl}}} \cdot l_{\text{Stahl}}$$

Gleichung 10

mit

$$\sigma = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot (d_a^2 - d_i^2)}$$

Gleichung 11

Die Glasscheibe wurde auf der anderen Seite flächig geklebt und übertrug die Kraft über einen Großteil der Fläche.¹¹¹

$$v_{\text{Glas}} = \frac{\sigma_{\text{Glas}}}{E_{\text{Glas}}} \cdot l_{\text{Glas}}$$

Gleichung 12

mit

$$\sigma_{\text{Glas}} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot (d_{a,\text{Glas}}^2 - d_{i,\text{Glas}}^2)}$$

Gleichung 13

Somit konnte durch Elimination der Fügeteilverformung die Verformung und Dehnung der Klebfuge berechnet werden.

$$\varepsilon_K = \frac{v_K}{d_K} = \frac{v_{\text{Ges}} - v_{\text{Stahl}} - v_{\text{Glas}}}{d_K}$$

Gleichung 14

¹¹¹ Vereinfachend wurde die gesamte Fläche der Glasscheibe angesetzt. Berechnungen mit einer genauer ermittelten Lastverteilungsfläche ergaben Abweichungen von maximal 3 %.

8.3.2 Ermittlung der Gleitung

Bei den Torsionsversuchen wird durch das eingeleitete Torsionsmoment M_t eine Verschiebung der Messpunkte in Umfangsrichtung erzeugt. Wichtig für den weiteren Lösungsweg ist die relative Verschiebung der Punkte zueinander und nicht der absolut zurückgelegte Weg. Unter Berücksichtigung der Fügeilverformungen kann somit die Verschiebung der Klebschicht berechnet werden.

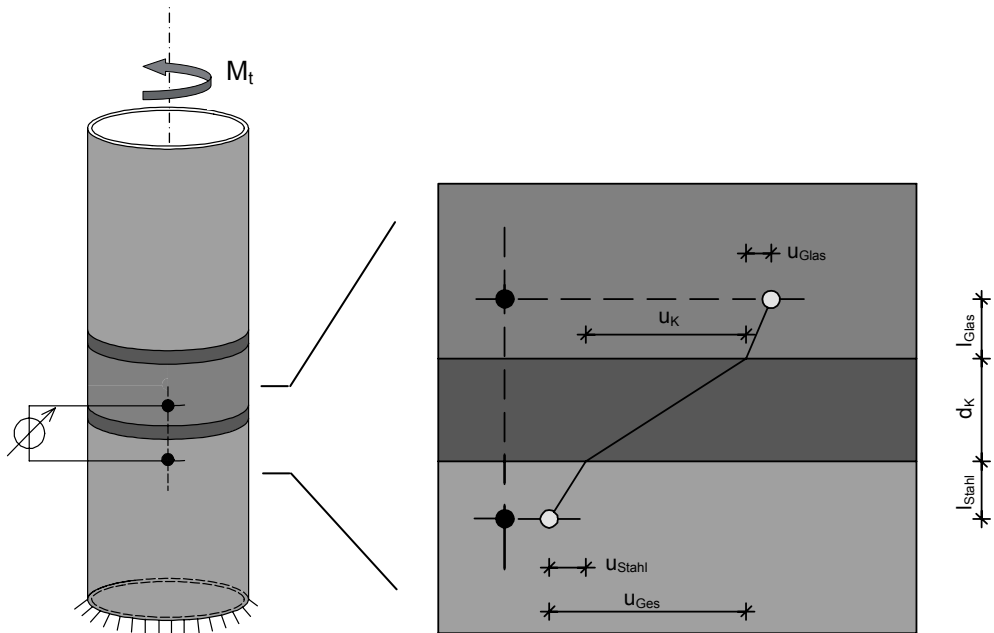


Bild 73 Systematische Darstellung der Verschiebung infolge Schubbelastung. Links zu sehen ist die Rohrprobe mit den Verformungsmesspunkten. Rechts dargestellt ist mit schwarzen Punkten der Ausgangszustand und mit weißen Punkten die Lage der Verformungsmesspunkte nach Aufbringen der Schubbelastung. Die Verformung der Klebfuge wird durch u_K beschrieben.

Die gemessene Verformung setzt sich neben dem auf die Klebfuge entfallenden Anteil weiterhin aus dem Anteil von Metall und Glas zusammen.

$$u_{\text{Ges}} = u_{\text{Stahl}} + u_{\text{K}} + u_{\text{Glas}}$$

Gleichung 15

Aus dem aufgebrachten Torsionsmoment M_t und dem Schubmodul G lässt sich die Fügeilverformung ermitteln. In diese Berechnung fließt die Tatsache ein, dass die Fügeverschiebung u_{Stahl} und u_{Glas} im Verhältnis zur Länge l_{Stahl} und l_{Glas} gering ist und dass der Tangens kleiner Winkel dem Winkel selbst entspricht.¹¹²

Für Stahl ergibt sich

$$u_{\text{Stahl}} = \frac{\tau}{G_{\text{Stahl}}} \cdot l_{\text{Stahl}}$$

Gleichung 16

mit

$$\tau = \frac{16 \cdot M_t \cdot d_a}{\pi \cdot (d_a^4 - d_i^4)}$$

Gleichung 17

Für Glas ergibt sich¹¹³

$$u_{\text{Glas}} = \frac{\tau_{\text{Glas}}}{G_{\text{Glas}}} \cdot l_{\text{Glas}}$$

Gleichung 18

mit

$$\tau_{\text{Glas}} = \frac{16 \cdot M_t \cdot d_{a,\text{Glas}}}{\pi \cdot (d_{a,\text{Glas}}^4 - d_{i,\text{Glas}}^4)}$$

Gleichung 19

Damit lässt sich die Verschiebung im Klebstoff und mit der Klebstoffdicke die Gleitung berechnen.

$$\gamma = \arctan \frac{u_{\text{K}}}{d_{\text{K}}} = \arctan \frac{u_{\text{Ges}} - u_{\text{Stahl}} - u_{\text{Glas}}}{d_{\text{K}}}$$

Gleichung 20

¹¹² Für die weitere Berechnung wird die Schubspannung zugrunde gelegt, die an der äußeren Seite des Rohres bei d_a entsteht.

¹¹³ Vereinfachend wurde die gesamte Fläche der Glasscheibe angesetzt. Berechnungen mit einer genauer ermittelten Lastverteilungsfläche ergaben Abweichungen von maximal 3 %.

Wird eine kombinierte Beanspruchung aus Zug- und Torsionsbelastung durchgeführt, ist bei der Berechnung der Gleitung die Verformung der Klebschicht infolge Zug zu berücksichtigen.

$$\gamma = \arctan \frac{u_K}{d_K + v_K}$$

Gleichung 21

8.4 Auswertung

Als Grundlage für die theoretischen Betrachtungen werden eine exakte und fehlerfreie Fertigung und eine vollständige Haftung des Klebstoffes an den Fügeteilen vorausgesetzt. Der Klebstoff wird als homogenes und isotropes Material betrachtet, das heißt an jeder Stelle im Material sind alle Richtungen bezüglich der elastischen Eigenschaften gleichberechtigt.¹¹⁴ Für diesen Sonderfall der Isotropie kann das HOOKEsche Gesetz für den räumlichen Fall in VOIGTscher Notation wie folgt geschrieben werden:¹¹⁵

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix}$$

Gleichung 22

Die im Vergleich zu dem Rohrquerschnitt sehr dünne Klebschicht haftet an den steifen Glas- und Metallprofilen. Dadurch kann für eine Belastung in axialer Richtung die Annahme getroffen werden, dass die Klebschicht lediglich in Kraftrichtung, der x-Richtung, eine Verformung erfährt. In radialer Richtung bewirkt die angenommene Querdehnungs-

¹¹⁴ Vergleiche hierzu Richter 2005, Seite 23. Bei dieser Betrachtung wird die Störung durch die Glasperlen als Abstandhalter vernachlässigt.

¹¹⁵ Vergleiche hierzu Barthel 2007, Seite 46.

behinderung, dass die Klebschicht sich nicht einschnürt. In tangentialer Richtung kann durch die ringförmige Ausbildung der Klebfuge keine Verformung erfolgen. Bei Zugbelastung tritt keine Schubbeanspruchung in der Klebfuge auf. Unter diesen Voraussetzungen bildet sich ein einachsiger Verformungszustand mit

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Gleichung 23

Daraus entsteht ein dreiachsiger Spannungszustand mit

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \begin{bmatrix} (1-\nu)\varepsilon_x \\ \nu\varepsilon_x \\ \nu\varepsilon_x \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Gleichung 24

Aus dieser Matrix lässt sich der Zusammenhang zwischen Zugspannung und Dehnung in Längsrichtung für den linear-elastischen Anfangsbereich ablesen:

$$\sigma_x = \frac{E \cdot (1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \cdot \varepsilon_x$$

Gleichung 25

Die Steigung der Kurven im Spannungs-Dehnungs-Diagramm für den linear-elastischen Anfangsbereich kann durch den Proportionalitätsfaktor E^* ausgedrückt werden.

$$E^* = \frac{\sigma_x}{\varepsilon_x}$$

Gleichung 26

Nach Umformen erhält man den Elastizitätsmodul E in Abhängigkeit von der Querdehnzahl ν und dem Proportionalitätsfaktor E^* .

$$E = \frac{1 - \nu - 2\nu^2}{1 - \nu} \cdot E^*$$

Gleichung 27

Aus der Steigung der Kurven im Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm lässt sich für den linear-elastischen Anfangsbereich der Schubmodul G ermitteln.

$$G = \frac{\tau}{\tan \gamma}$$

Gleichung 28

Für das isotrope Materialgesetz besteht eine Abhängigkeit zwischen dem Schubmodul G , dem Elastizitätsmodul E und der Querdehnzahl ν .

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Gleichung 29

Um die Querdehnzahl ν auszurechnen, sind die vorangehenden Gleichungen umzuformen und nach ν aufzulösen. Danach ist sie mit den direkt aus den Versuchen ermittelten Werten für den Proportionalitätsfaktor E^* und dem Schubmodul G berechenbar.

$$\nu = \frac{1 - 2 \frac{G}{E^*}}{2 \left(1 - \frac{G}{E^*}\right)}$$

Gleichung 30

8.5 Ergebnisse für den Photobond 4468

Zusammenfassend werden die Ergebnisse der Versuche an den Rohrproben für den Acrylatklebstoff Photobond 4468 in den folgenden Diagrammen dargestellt. Soweit möglich werden die Ergebniskurven im Diagramm mit gleicher Einteilung der Achsen dargestellt, um einen direkten Vergleich zu vereinfachen. In Einzelfällen muss zur deutlichen Darstellung davon abgewichen werden.

Da zur Ermittlung der elastischen Materialkennwerte¹¹⁶ sowohl der Zug- als auch der Torsionsversuch ausgewertet werden musste, sind für jeden Temperaturlastfall die beiden entsprechenden Diagramme untereinander dargestellt.

¹¹⁶ Die 'elastischen Materialkennwerte' bezeichnen diejenigen Kennwerte, die im Anfangsbereich der Versuchskurven ermittelt werden. Für die Ermittlung wird das HOOKEsche Gesetz zugrunde gelegt, das ein elastisches Materialgesetz beschreibt. Nach den Kurvenverläufen kann man von einem linear-elastischen Verhalten im Anfangsbereich ausgehen. In weiterführenden Untersuchungen wird derzeit das Verhalten unter Be- und Entlastung überprüft.

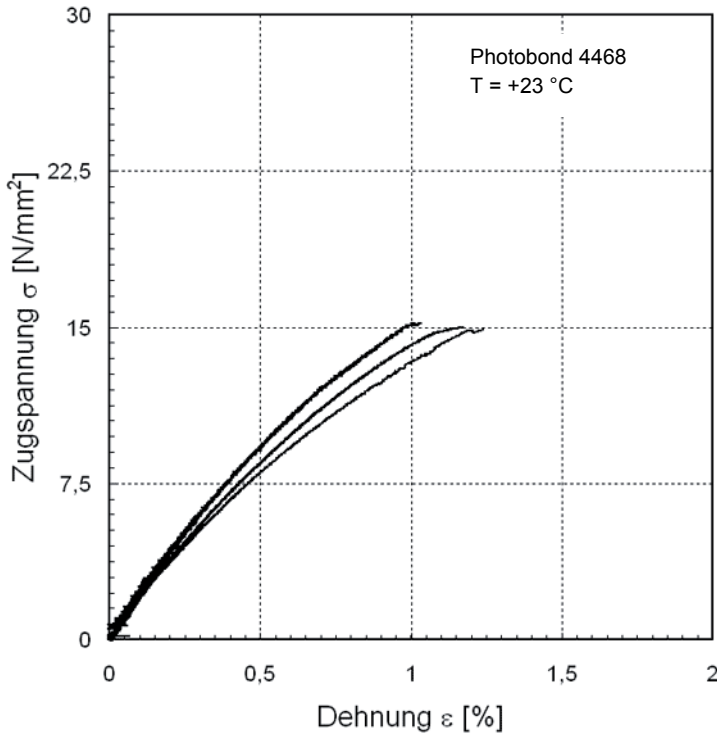


Bild 74 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur. Es zeigt sich ein gleichförmiger, nahezu linearer Kurvenverlauf. Die dargestellten Zugspannungen und Dehnungen beziehen sich auf die x-Richtung, die Kraftrichtung.

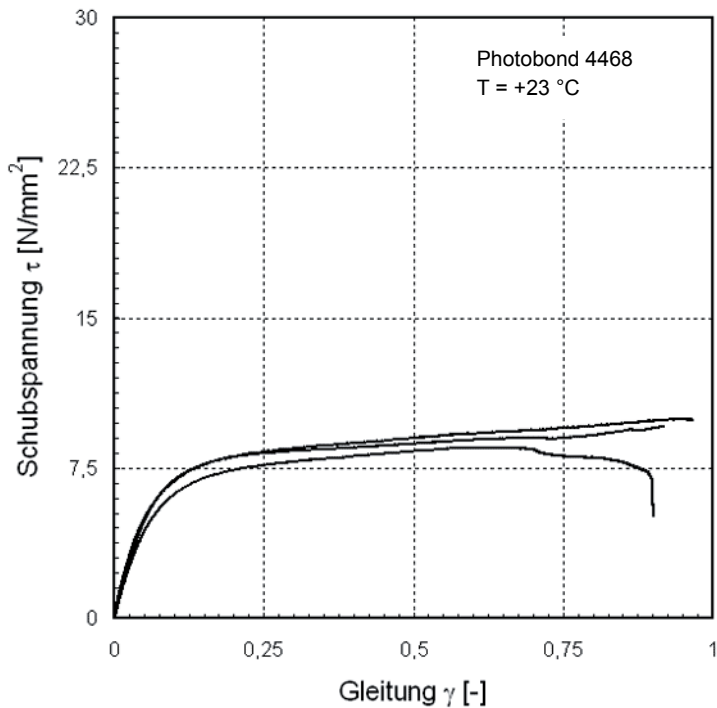


Bild 75 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur. Die Kurven beschreiben einen in etwa bilinearen Spannungsverlauf. Das Materialverhalten zeigt nach dem anfänglichen linearen Bereich eine flacher ansteigende Gerade mit nur schwach verfestigenden Eigenschaften.

Bei Raumtemperatur zeigt das Zugspannungs-Dehnungs-Diagramm für die drei Prüfkörper, die mit dem Photobond 4468 geklebt wurden, einen nahezu linearen Verlauf über die gesamte Messung. Die Kurven nehmen zum Ende hin eine geringfügig flachere Neigung an. Es kann im Wesentlichen von einem linearen Materialverhalten ausgegangen werden.

Mit den gleichmäßigen Kurvenverläufen erzielen die drei Prüfkörper Maximalwerte, die nur geringfügig streuen. Die Bruchspannungen liegen bei 15 N/mm^2 . Die Dehnungen bei Bruch erzielen Werte zwischen 1 und 1,2 %.

Das Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur zeigt einen nahezu bilinearen Verlauf. Der Anfangsbereich deutet auf ein linearelastisches Verhalten hin. Nach dem knieförmigen¹¹⁷ Übergang bei etwa $7,5 \text{ N/mm}^2$ und einer Gleitung von 0,1 deutet sich der Fließbeginn an. Die zweite Gerade kennzeichnet ein plastisches Verhalten. Hier ist ein nur geringer Anstieg der aufnehmbaren Spannungen bei deutlich zunehmenden Dehnungen zu verzeichnen. Der Klebstoff verfestigt sich lediglich geringfügig.

Auch bei diesen Versuchen ist eine gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe zu bemerken. Die Streuungen sind geringfügig. Die Werte für die maximale Schubspannung liegen bei etwa 9 N/mm^2 .

¹¹⁷ Unter 'Knie' bezeichnet man im Spannungs-Verformungs-Diagramm den Übergang zwischen Bereichen unterschiedlicher Steigungen. Vergleiche hierzu Barthel 2007, Seite 81.

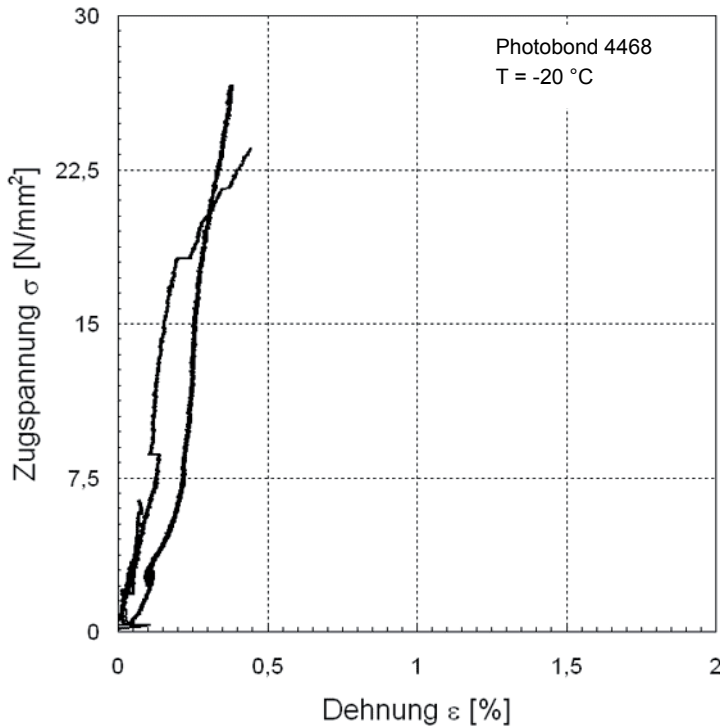


Bild 76 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei -20 °C. Die Kurven spiegeln das sehr spröde Verhalten des Klebstoffes bei niedrigen Temperaturen wider. Bei dem Prüfkörper, der bei niedriger Belastung versagte, trat Glasbruch auf. Die dargestellten Zugspannungen und Dehnungen beziehen sich auf die x-Richtung, die Krafrichtung.

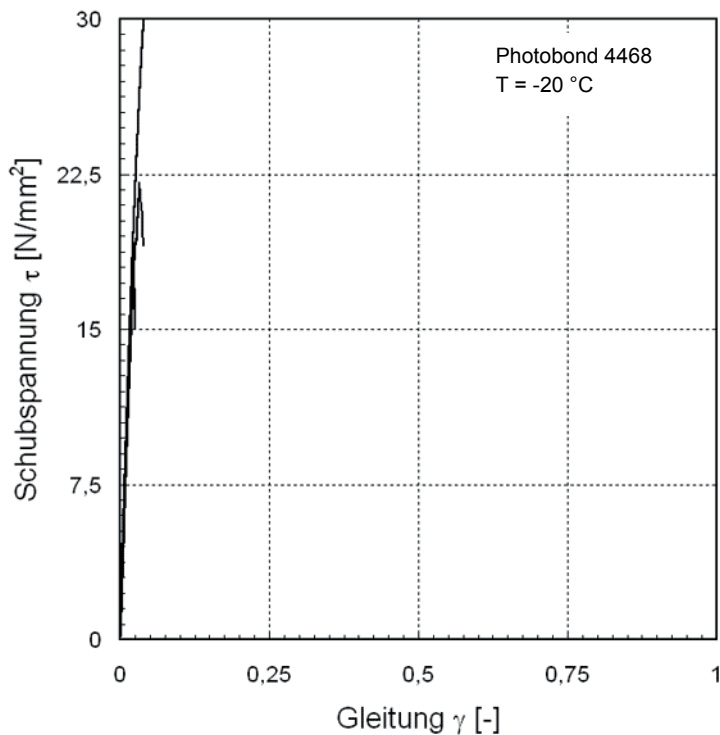


Bild 77 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei -20 °C. Die maximale aufnehmbare Schubspannung der einen Probe liegt bei 30,2 N/mm², endet knapp außerhalb des dargestellten Bereiches. Die Kurvenverläufe zeigen ein steifes Verhalten des Klebstoffes mit einem schlagartigen Versagen.

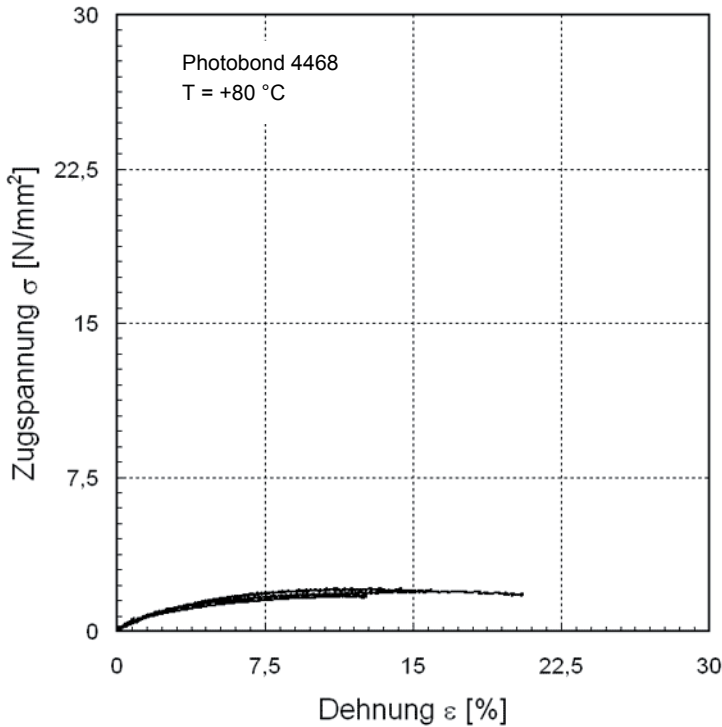


Bild 78 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei +80 °C. Die Proben zeigen ein sehr weiches Verformungsverhalten mit hohen aufnehmbaren Dehnungen. Deshalb musste die Achse der Dehnungen einen größeren Bereich abdecken und unterscheidet sich von der üblichen Darstellung. Die dargestellten Zugspannungen und Dehnungen beziehen sich auf die x-Richtung, die Kraftrichtung.

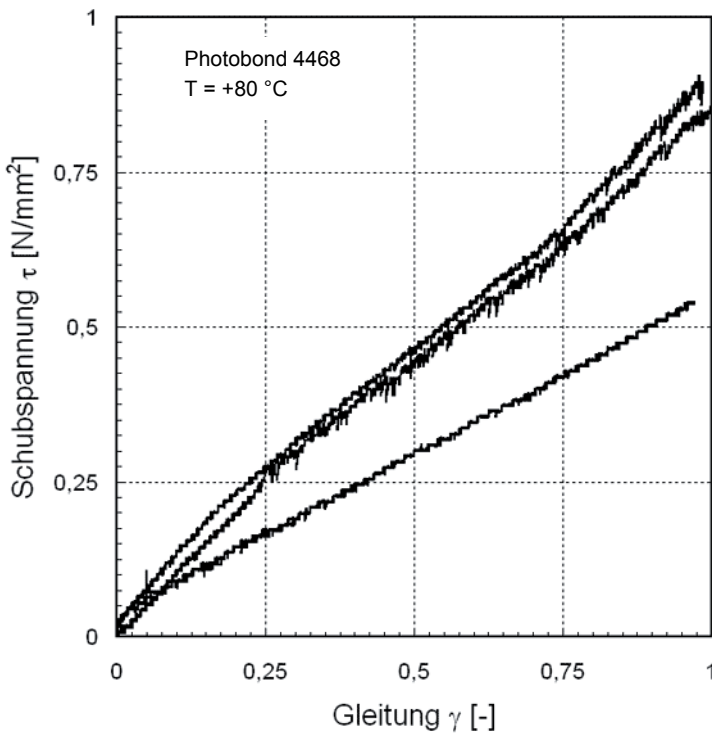


Bild 79 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei +80 °C. Der Klebstoff verhält sich sehr weich und nimmt nur geringe Kräfte auf. Für diese Darstellung musste die Skalierung der Spannungsachse angepasst werden.

Die Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt das spröde Verhalten des Klebstoffes. Nach einem idealisierten linearen Bereich tritt ein plötzliches Versagen auf. Die Maximalwerte weisen eine große Streuung auf. Zwei Versuche erzielten Zugspannungen um 25 N/mm^2 bei Bruchdehnungen von etwa $0,4\%$. Der dritte Versuch endete vorzeitig bei einem Wert von 7 N/mm^2 . Hier versagte die Rohrprobe durch Glasbruch.

Bei einer Temperaturbelastung von $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt sich im Zugspannungs-Dehnungs-Diagramm für den Klebstoff ein sehr weicher Verlauf. Nach einem kurzen Anfangsbereich stellt sich ein stetiger Übergang zu plastischen Verformungen ein. Wachsende Dehnungswerte treten bei nahezu gleichbleibenden Spannungen auf. Die Maximalwerte der Zugspannung liegen gleichmäßig bei 2 N/mm^2 .

Das Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt ein ausgeprägtes lineares und steifes Verhalten. Die Prüfkörper versagten schlagartig. Die Maximalwerte streuen von 18 bis 30 N/mm^2 . Dabei wird eine sehr geringe Gleitung von etwa $0,03$ erzielt.

Bei $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt sich in der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung ein nahezu lineares Verhalten. Es wird eine Gleitung von nahezu 1 erzielt.

Im Vergleich zu den Kurven bei Raumtemperatur ist ein deutliches temperaturabhängiges Verhalten zu erkennen. Bei niedrigen Temperaturen verhält sich der Photobond 4468 äußerst spröde. Nach einem steilen Anstieg, der ein steifes Materialverhalten bedeutet, versagten die Klebverbindungen schlagartig. Dagegen weisen die Kurven bei hohen Temperaturen ein sehr nachgiebiges Verhalten auf. Geringe Spannungen treten zusammen mit hohen Verformungen auf.

Idealisiert kann man bei allen Kurven von einem linearen Anfangsverhalten ausgehen.

Für die Ermittlung der elastischen Materialkennwerte wurde der lineare Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Kurven genauer betrachtet.¹¹⁸ Die Steigung der Kurven in diesem Bereich dient der weiteren Auswertung. Exemplarisch wurde die Vorgehensweise an den Diagrammen bei Raumtemperatur ausführlich behandelt.

Im Zugspannungs-Dehnungs-Diagramm wurden neben den Einzelkurven sowohl die Mittelwertkurve als auch die Steigung im linearen Anfangsbereich eingezeichnet. Diese Gerade ergibt den Proportionalitätsfaktor E^* , der für die weitere Auswertung erforderlich ist. Gleichmaßen war die Vorgehensweise im Schubspannungs-Gleitungs-Diagramm. Die Gerade, die die Steigung im linearen Anfangsbereich markiert, ergibt den Wert des Schubmoduls G .

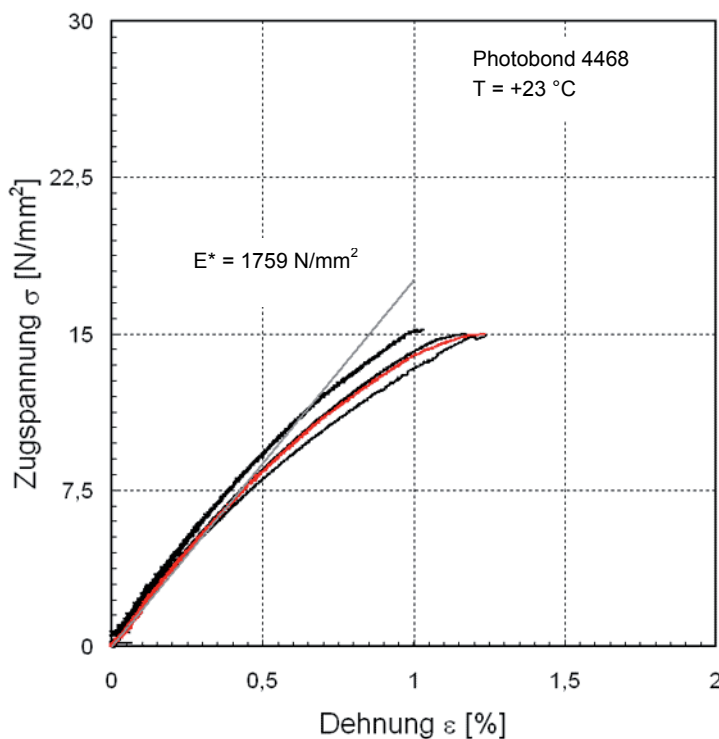


Bild 80 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur. Die rote Kurve kennzeichnet den Mittelwert aus den drei Versuchen. Die graue Linie ist die Steigung im linearen Anfangsbereich, sie ergibt den Proportionalitätsfaktor E^* .

¹¹⁸ Vergleiche hierzu EN 14869-1, Abschnitt 10.3, Seite 11.

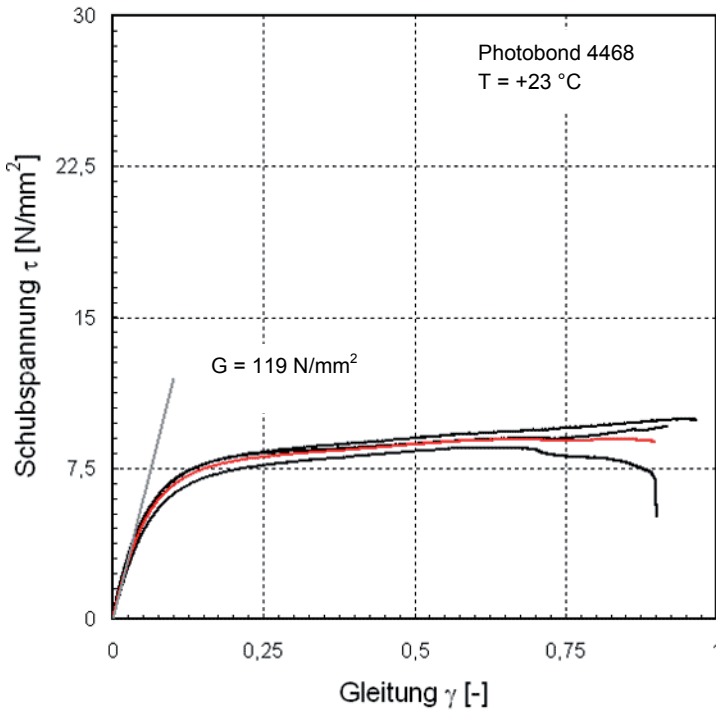


Bild 81 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur. Die rote Kurve kennzeichnet den Mittelwert aus den drei Versuchen. Die graue Linie ist die Steigung im linearen Anfangsbereich und ergibt den Wert für den Schubmodul G.

Zusammenfassend für alle drei Temperaturen ergeben sich die folgenden Steigungen für den Photobond 4468.

	-20 °C	+23 °C	+80 °C
Proportionalitätsfaktor E^* [N/mm²]	6094	1759	52
Schubmodul G [N/mm²]	826	119	1

Tafel 8 Steigungen aus den Diagrammen für den Photobond 4468 bei -20 °C, +23 °C und +80 °C und einer Klebschichtdicke von 0,5 mm.

Aus diesen beiden Werten - Proportionalitätsfaktor E^* und Schubmodul G - konnten nun nach Gleichung 26 und 29 der Elastizitätsmodul und die Querdehnzahl ermittelt werden.

	-20 °C	+23 °C	+80 °C
Elastizitätsmodul E [N/mm²]	2348	349	4
Schubmodul G [N/mm²]	826	119	1
Querdehnzahl ν	0,42	0,46	0,488

Tafel 9 Materialkennwerte für den Photobond 4468 bei -20 °C, +23 °C und +80 °C und einer Klebschichtdicke von 0,5 mm.

8.6 Ergebnisse für den Photobond GB485

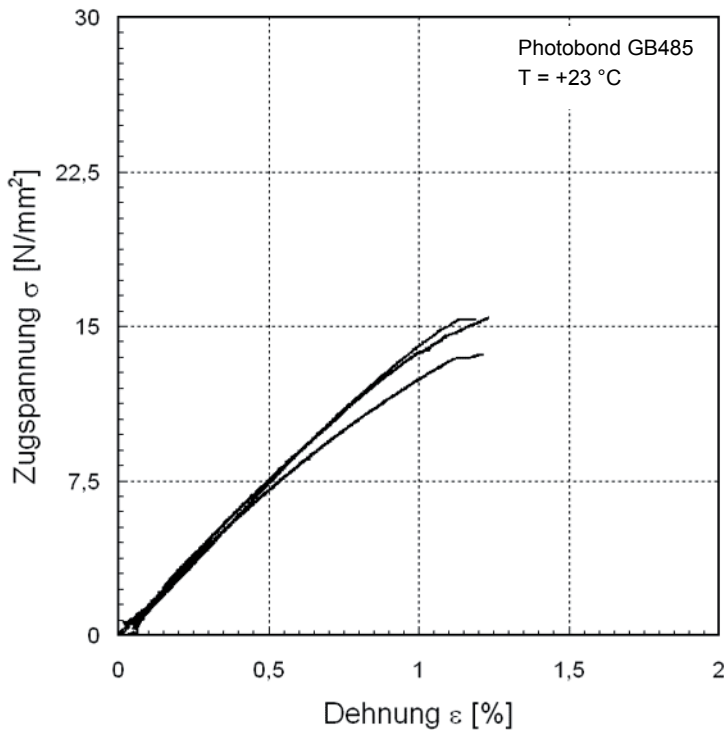


Bild 82 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei Raumtemperatur. Die Kurven zeigen ein nahezu lineares Verhalten. Die dargestellten Zugspannungen und Dehnungen beziehen sich auf die x-Richtung, die Kraft-Richtung.

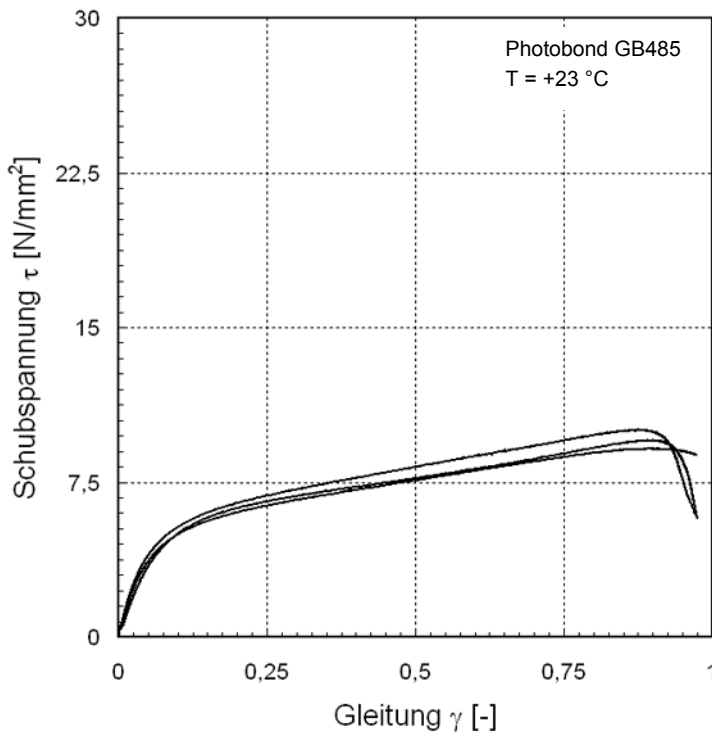


Bild 83 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei Raumtemperatur. Der Kurvenverlauf deutet auf einen bilinearen Verlauf hin, mit elastischem Anfangsbereich und danach mit einem plastisch verfestigenden Verhalten.

Der Photobond GB485 zeigt bei Raumtemperatur unter Zugbelastung ein nahezu lineares Verhalten. Die Kurven verlaufen besonders im Anfangsbereich fast deckungsgleich. Die Prüfkörper versagen bei gleichförmigen Dehnungswerten vom 1,2 %. Die dazugehörigen Spannungen erzielen Werte zwischen 13 und 16 N/mm².

In der Schubspannungs-Dehnungs-Beziehung zeigt der Klebstoff bei Raumtemperatur ein nahezu bilineares Verhalten. Der gesamte Kurvenverlauf kann durch zwei Geraden beschrieben werden. Im Anfangsbereich kann von einem linear-elastischen Verhalten ausgegangen werden. Die zweite Gerade weist auf ein plastisches Verhalten mit Verfestigung hin. Die Kurven liegen eng beieinander und weisen eine geringe Streuung auf. Die Maximalwerte der Spannungen liegen bei etwa 10 N/mm² und einer Gleitung von 0,9. Der Übergang zum plastischen Verhalten, das sogenannte Knie, liegt bei etwa 5 N/mm² und einer Gleitung von 0,1.

Für Temperaturen von -20 °C zeigt sich für den Photobond GB485 in der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung ein steiles und lineares, eher sprödes Verhalten bis zum Versagen. Die Maximalwerte der aufnehmbaren Zugspannungen streuen von 12 bis 20 N/mm², die Bruchdehnungen dagegen liegen gleichmäßig bei etwa 0,15 %.

Für Temperaturen von +80 °C ist in der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung am Anfang ein lineares Materialverhalten festzustellen. Nach Erreichen der Streckspannung geht es über in ein plastisches Verhalten mit starker Kriechneigung. Mit abnehmender Belastung wird eine schnell größer werdende Verformung erzielt. Der Maximalwert der Zugspannung wird als lokales Maximum bei einer Streckspannung von etwa 2,5 N/mm² erreicht. Die dazugehörigen Dehnungen liegen bei etwa 5 %. Die Bruchdehnungen erzielen Größenordnungen von 75 %. Ab dem Erreichen einer Dehnung von etwa 30 % ist keine Laständerung erkennbar.

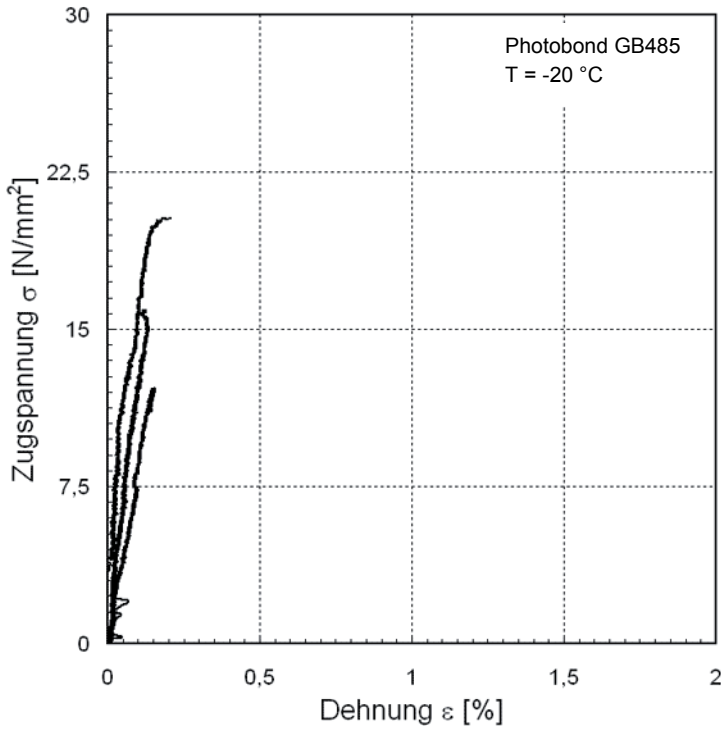


Bild 84 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei -20 °C. Die Kurven weisen einen einheitlich steilen Verlauf auf mit streuenden Bruchspannungen. Die dargestellten Zugspannungen und Dehnungen beziehen sich auf die x-Richtung, die Kraftrichtung.

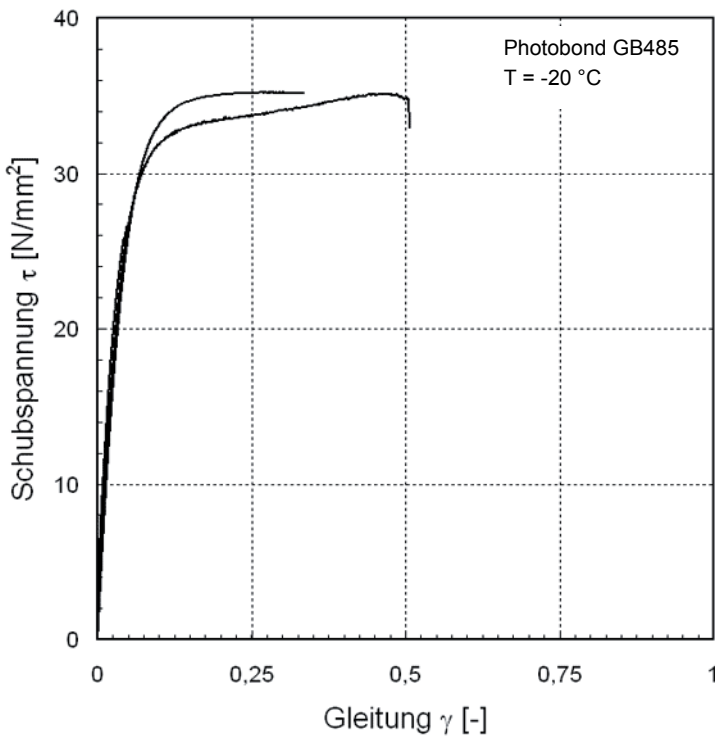


Bild 85 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei -20 °C. Nach einem ausgeprägten einheitlichen und linearen Anfangsbereich stellt sich ein plastisches Verhalten ein.

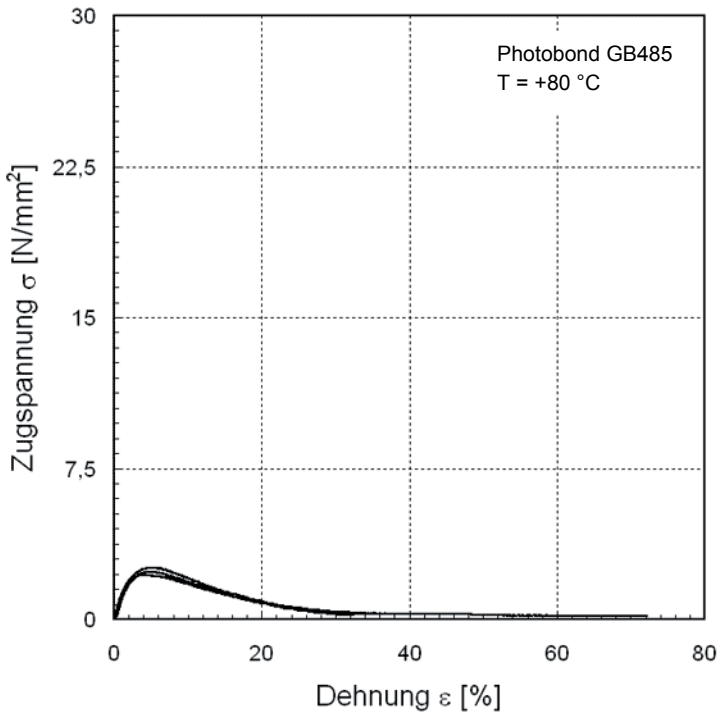


Bild 86 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei +80 °C. Die Kurven weisen einen gleichförmigen Verlauf auf. Bei recht niedrigen Spannungswerten verformt sich der Klebstoff deutlich. Wegen den hohen Verformungen musste die Skalierung der unteren Achse verändert werden. Zwei der Versuche wurden vorzeitig bei Dehnungen von 30 % abgebrochen. Die dargestellten Zugspannungen und Dehnungen beziehen sich auf die x-Richtung, die Kraftrichtung.

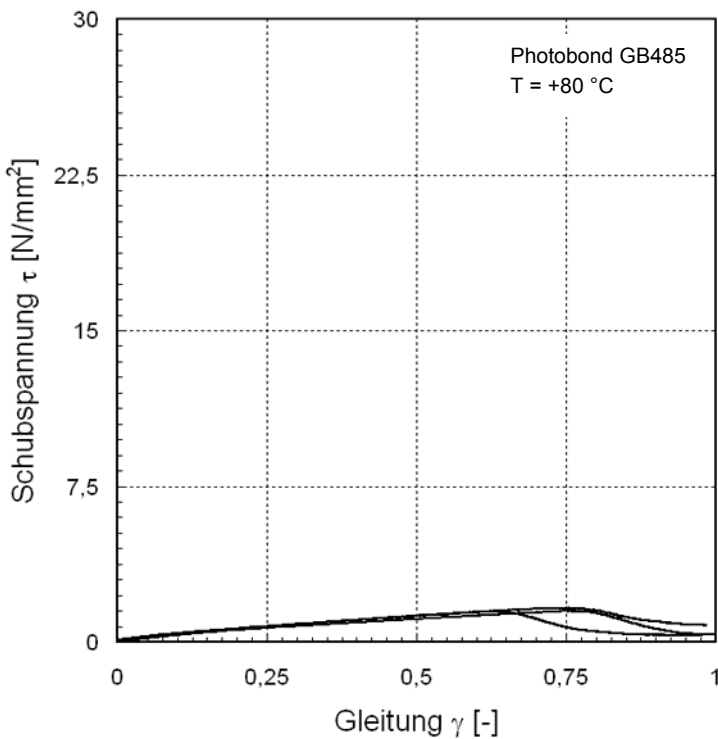


Bild 87 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei +80 °C. Wie bei der Zugbelastung verformt sich der Klebstoff unter geringen Spannungen deutlich.

Bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt die Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond GB485 ein bilineares Verformungsverhalten. Nach dem steilen und linearen Anstieg gehen die Kurven über in eine flache Gerade bis zum Bruch. Dieser Bereich zeigt eine deutliche Verformungszunahme ohne weitere Spannungssteigerung. Die Streckgrenze liegt bei etwa 33 N/mm^2 und einer Gleitung von 0,12. Die Bruchspannungen der Kurven liegen bei 35 N/mm^2 bei streuenden Bruchdehnungen.

In der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung bei $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird ein der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung ähnlicher Kurvenverlauf beobachtet. Bis zur Streckspannung ist ein linearer Verlauf zu erkennen. Die Spannungsmaxima liegen bei $1,5\text{ N/mm}^2$ und einer Gleitung von etwa 0,7. Danach beginnt das Fließen bei abnehmenden Spannungen. Dies spricht auch hier für das sehr nachgiebige Verhalten bei hohen Temperaturen.

Auch der Photobond GB485 zeigt ein ausgeprägtes temperaturabhängiges Verhalten. Bei niedrigen Temperaturen, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, verhält der Klebstoff sich im Anfangsbereich steif. Jedoch tritt das Versagen bei Schubbelastung erst nach einem plastischen Bereich auf. In diesem Fall kann nicht von einem Sprödbbruch gesprochen werden. Bei hohen Temperaturen weisen die Kurven ein sehr weiches Verhalten auf. Hohe Verformungen werden durch niedrige Spannungen hervorgerufen.

Auch bei diesem Acrylatklebstoff kann man bei allen Kurven von einem linearen Anfangsverhalten ausgehen.

Die elastischen Materialkennwerte wurden wiederum im linearen Anfangsbereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehungen ermittelt. Die Gerade im Zugspannungs-Dehnungs-Diagramm ergibt den Wert für den Proportionalitätsfaktor E^* . Aus der Steigung in der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung lässt sich der Schubmodul G berechnen.

Zusammenfassend für alle drei Temperaturen ergeben sich die folgenden Steigungen für den Photobond GB485.

	-20 °C	+23 °C	+80 °C
Proportionalitätsfaktor E* [N/mm²]	14766	1448	104
Schubmodul G [N/mm²]	1021	96	3

Tafel 10 Steigungen aus den Diagrammen für den Photobond GB485 bei -20 °C, +23 °C und +80 °C und einer Klebschichtdicke von 0,5 mm.

Als Ergebnis können nun die elastischen Materialkennwerte Elastizitätsmodul E, Schubmodul G und Querdehnzahl ν bei einer Klebstoffdicke von $d_K = 0,5$ mm für die drei Temperaturen zusammengefasst werden.

	-20 °C	+23 °C	+80 °C
Elastizitätsmodul E [N/mm²]	2988	281	21
Schubmodul G [N/mm²]	1021	96	3
Querdehnzahl ν	0,46	0,46	0,485

Tafel 11 Materialkennwerte für den Photobond GB485 bei -20 °C, +23 °C und +80 °C und einer Klebstoffdicke von 0,5 mm.

8.7 Vergleich der Ergebnisse

In den folgenden Diagrammen werden die Versuchsergebnisse beider Acrylatklebstoffe als Mittelwertkurven dargestellt.¹¹⁹ Aufgeteilt in Zug- und Schubbeanspruchung werden die Ergebnisse für die drei Temperaturen -20 °C, +23 °C und +80 °C gegenüber gestellt.

Beide Klebstoffe zeigen eine starke Temperaturabhängigkeit. Bei niedrigen Temperaturen verhalten sich beide sehr steif, hohe Kräfte werden bei geringen Dehnungen aufgenommen. Bei hohen Temperaturen zeigen beide Acrylate flache Kurvenverläufe. Bei geringen Spannungen treten hohe Verformungen auf, die Klebstoffe nehmen ein äußerst nachgiebiges Verhalten an.

¹¹⁹ Die Mittelwertkurven basieren auf den drei Prüfkörperversuchen. Sie sind bis zum Versagen des ersten Prüfkörpers dargestellt.

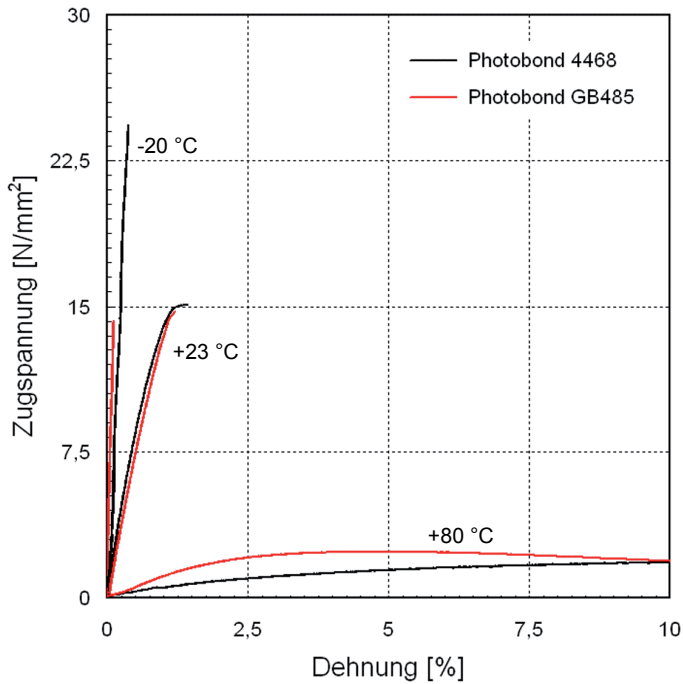


Bild 88 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für Temperaturen von -20 °C, +23 °C und +80 °C und die Acrylatklebstoffe Photobond 4468 und Photobond GB485. Die Ergebnisse sind als Mittelwertkurven dargestellt. Die Dehnungen wurden zur besseren Darstellung bei 10 % abgeschnitten, danach tritt keine wesentliche Veränderung der Spannungswerte ein.

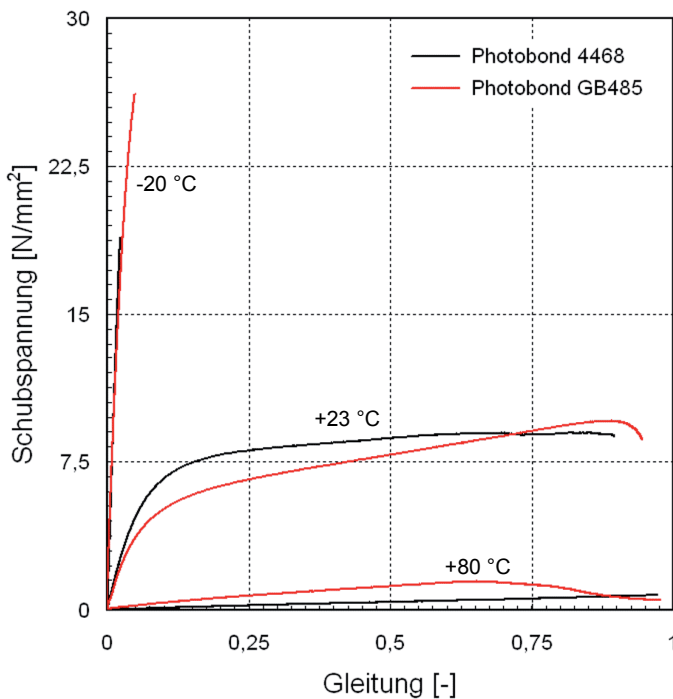


Bild 89 Schubspannungs-Dehnungs-Beziehung für Temperaturen von -20 °C, +23 °C und +80 °C und die Acrylatklebstoffe Photobond 4468 und Photobond GB485.

In der Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung bei Raumtemperatur zeigen beide Klebstoffe einen ähnlichen Kurvenverlauf, der auf ein nahezu linear-elastisches Materialverhalten im Anfangsbereich schließen lässt. Dabei verhält sich der Photobond 4468 geringfügig steifer als der Photobond GB485.

Da bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Bruchspannungen stark streuten und ein Prüfkörper bei niedrigen Kräften durch Glasbruch versagte, kann hier nur die Steigung verglichen werden. Hier zeigt sich, dass sich der Photobond GB485 im Gegensatz zum Photobond 4468 steifer verhält.

Auffallend ist der Unterschied beider Klebstoffe bei einer Temperatur von $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Photobond 4468 erfährt bei einer stetig steigenden Spannungszunahme einen anfänglich nahezu linearen Anstieg der Dehnungen. Der Photobond GB485 hingegen erreicht sein Maximum nach einem etwas steileren Anstieg der Spannungen. Anschließend nehmen die Dehnungen zu, während die Spannungen abfallen.

Das Schubspannungs-Dehnungs-Diagramm bei Raumtemperatur zeigt bei beiden Klebstoffen einen nahezu bilinearen Verlauf, einen elastischen Anfangsbereich und nach dem Knie ein plastisch verfestigendes Verhalten. Dabei nimmt der Photobond 4468 im Anfangsbereich ein etwas steiferes Verhalten ein. Nach dem Erreichen der Streckgrenze verhält der Klebstoff sich hingegen weicher als der Photobond GB485.

Bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ streuen die Werte der Bruchspannungen bei Schubbelastung verhältnismäßig stark. Der Photobond GB485 verhält sich im linearen Anfangsbereich steifer als der Photobond 4468. Er nimmt jedoch - deutlich erkennbar in der vorherigen Darstellung der Einzelkurven - nach dem Erreichen des knieförmigen Übergangs ein plastisches Verhalten an. Der Photobond 4468 hingegen versagt spröde.

Bei $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ sind ebenfalls Unterschiede im Materialverhalten festzustellen. Der Klebstoff Photobond 4468 verhält sich nahezu linear, während der Photobond GB485 nach dem aus-

geprägten linearen Anfangsbereich bei abnehmenden Spannungen wachsende Dehnungen erfährt.

Die aus diesen Versuchen an der Rohrprobe ermittelten Materialkennwerte - Elastizitätsmodul E , Schubmodul G und Querdehnzahl ν - zeigen eine deutliche Abhängigkeit von der Temperatur. Auch durch diese Werte werden das steifere Verhalten bei tiefen Temperaturen und das weichere Verhalten bei hohen Temperaturen ausgedrückt.

Der Elastizitätsmodul beider Klebstoffe fällt in dem Bereich von -20 °C bis $+23\text{ °C}$ deutlich ab. Die Werte bei Raumtemperatur betragen nur noch etwa 10 - 15 % der Werte bei -20 °C . Bei einem weiteren Anstieg der Temperaturen auf $+80\text{ °C}$ ist nochmals ein deutlicher Abfall der Werte zu verzeichnen. In dieser Darstellung wird verdeutlicht, dass der Photobond GB485 bei Raumtemperatur einen etwas niedrigeren Elastizitätsmodul als der Photobond 4468 besitzt, bei -20 °C und $+80\text{ °C}$ jedoch einen höheren.

Eine gleichwertige Betrachtung kann beim Schubmodul angesetzt werden. Hier zeigt sich, dass der Photobond GB485 im Temperaturbereich von -20 °C bis $+23\text{ °C}$ einen höheren Abfall der Werte aufzeigt als der Photobond 4468.

Die Querdehnzahl zeigt für den Photobond 4468 ein temperaturabhängiges Verhalten. Je höher die Temperatur, umso eher nähert sich die Querdehnzahl einem Wert von 0,5. Dagegen verändert sich der Wert der Querdehnzahl beim Photobond GB485 erst bei hohen Temperaturen. Für die Auswertung bei Raumtemperatur und bei -20 °C ergab sich ein konstanter Wert.

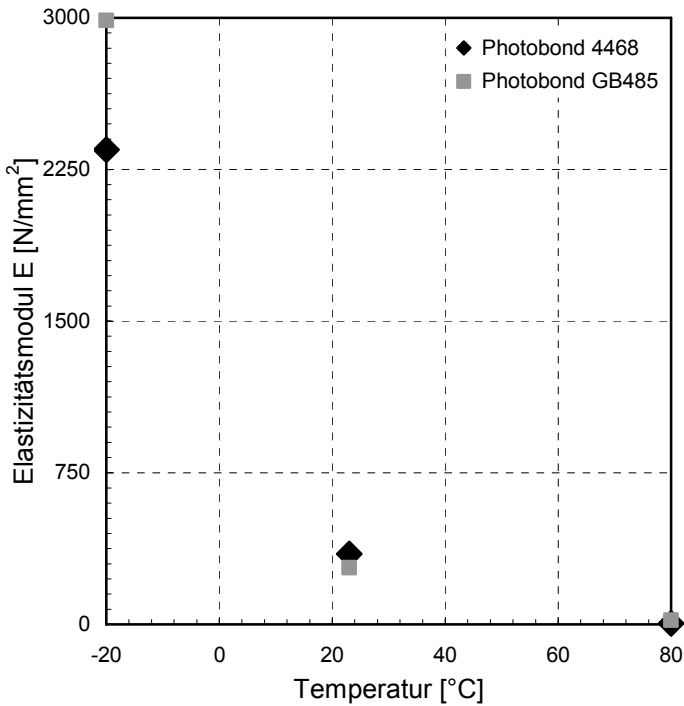


Bild 90 Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für den Photobond 4468 und den Photobond GB485. Die Werte für die Temperaturen -20 °C, +23 °C und +80 °C wurden an der Rohrprobe ermittelt. Es ist ein deutlicher Abfall der Werte bei steigender Temperatur zu sehen.

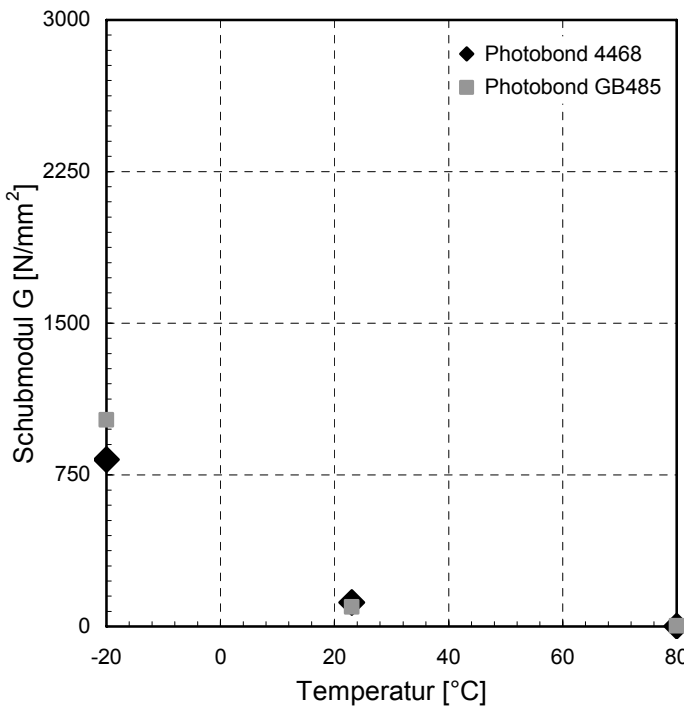


Bild 91 Schubmodul in Abhängigkeit von der Temperatur für den Photobond 4468 und den Photobond GB485. Die Werte für die Temperaturen -20 °C, +23 °C und +80 °C wurden an der Rohrprobe ermittelt. Je höher die Temperatur, umso niedriger ist der Wert des Schubmoduls.

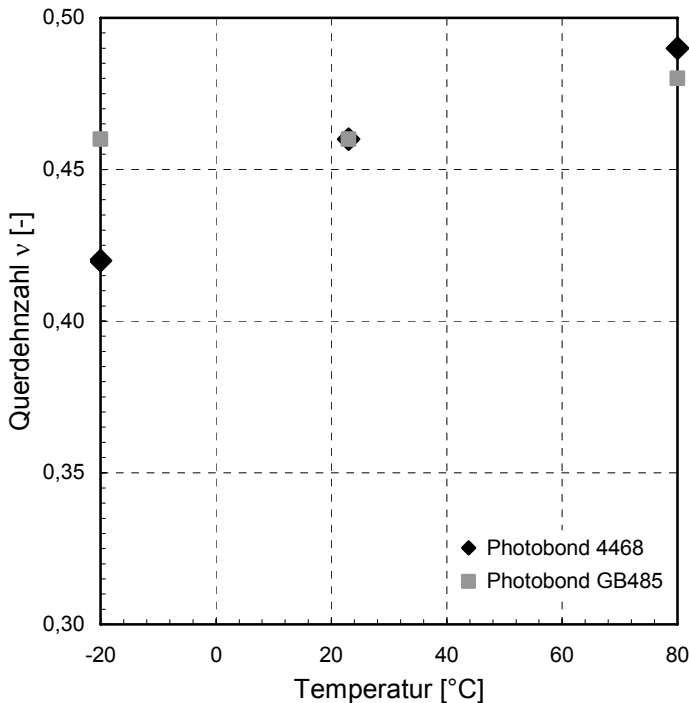


Bild 92 Querdehnzahl in Abhängigkeit von der Temperatur für den Photobond 4468 (schwarz) und den Photobond GB485 (rot). Die Werte für die Temperaturen -20 °C, +23 °C und +80 °C wurden an der Rohrprobe ermittelt. Die Querdehnzahlen für den Photobond 4468 zeigen ein temperaturabhängiges Verhalten, dagegen sind für den Photobond GB485 die Werte bei -20 °C und +23 °C konstant. Erst bei +80 °C ergibt sich ein höherer Wert.

8.8 Vergleich mit Kennwertermittlung an Substanzprüfkörpern

Die Materialkennwerte wurden sowohl an dem reinen Klebstoffmaterial anhand von Substanzprüfkörpern¹²⁰ als auch an dem Klebstoff in der Verbindung mit Fügeteilen anhand von in-situ-Prüfkörpern ermittelt. Für letztere wurde die Methode der Rohrprobe gewählt, da hier durch die Geometrie ein gleichmäßiger Spannungszustand entsteht.¹²¹

Deutlich erkennbar ist, dass die geklebten Prüfkörper weit-
aus weniger Dehnungen aufnehmen können. Das Versagen

¹²⁰ Vergleiche hierzu Kapitel 7.

¹²¹ Die Materialkennwerte wurden aus den Versuchsergebnissen unter Annahme einer vollständig behinderten Verformbarkeit des Klebstoffes in Breitenrichtung am freien Rand der Klebfuge ermittelt. Diese Annahme erweist sich als berechtigt, vergleiche hierzu Barthel 2007, Seite 114 ff. Die Überprüfung erfolgte über die numerische Ermittlung des Elastizitätsmoduls und zusätzlich über die Kontrolle der Spannungskomponenten in die drei Raumrichtungen. Für Silikone mit einer Querdehnzahl zwischen 0,495 und 0,498 - vergleiche hierzu Hagl 2007 - und Klebfugen mit Dicken von mindestens 6 mm ist die Kennwertermittlung an der Rohrprobe nicht sinnvoll, da unter dieser Annahme zu hohe Abweichungen auftreten.

bei Raumtemperatur tritt unter Zugbelastung bei etwa 1 % Dehnung auf. Dabei verhält sich das Material nahezu linear. Die Substanzprüfkörper nehmen bei Raumtemperatur Dehnungen von mehr als 100 % auf. Nach einem linearen Anfangsbereich fängt dabei das Material an, sich plastisch zu verformen. Dies trifft sowohl für den Photobond 4468 als auch für den Photobond GB485 zu.

Photobond 4468	Elastizitätsmodul [N/mm ²]		
	-20 °C	+23 °C	+80 °C
Rohrprobe	2348	349	4
Substanzprüfkörper	2202	298	2

Tafel 12 Elastizitätsmodul für den Photobond 4468 für die drei Temperaturen. Gegenübergestellt sind die Werte, die an Rohrproben und an Substanzprüfkörpern ermittelt wurden.

Beide Methoden zeigen die hohe Temperaturabhängigkeit der untersuchten Acrylate. Bei Minustemperaturen verhalten sie sich sehr steif, bei hohen Temperaturen sehr weich. Ein Vergleich der Elastizitätsmoduln zeigt für den Acrylatklebstoff Photobond 4468 bei der Rohrprobe erwartungsgemäß leicht höhere Werte als bei den Substanzprüfkörpern.¹²² Aufgrund der Verformungsbehinderung durch die steifen Fügeile und die Ausbildung einer Grenzschicht verhalten sich Klebstoffe in einer Klebverbindung steifer.

Photobond GB485	Elastizitätsmodul [N/mm ²]		
	-20 °C	+23 °C	+80 °C
Rohrprobe	2988	281	21
Substanzprüfkörper	1367	287	20

Tafel 13 Elastizitätsmodul für den Photobond GB485 für die drei Temperaturen. Gegenübergestellt sind die Werte, die an Rohrproben und an Substanzprüfkörpern ermittelt wurden.

Dagegen sind beim Photobond GB485 größere Abweichungen festzustellen. Die Werte bei Raumtemperatur und +80 °C liegen etwa im gleichen Bereich. Jedoch weichen die Werte für -20 °C deutlich voneinander ab. Der Elastizitätsmodul, der an der Rohrprobe ermittelt wurde, beträgt mehr als das Doppelte des Wertes, der sich aus den Versuchen an den Schulterstäben ergibt. An den Schulterstäben bei -20 °C ermittelt, zeigt der Photobond 4468 ein steiferes Ver-

¹²² Für den Vergleich werden diejenigen Werte angesetzt, bei denen die Substanzprüfkörper mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min gezogen wurden. Nach ISO 527-1 ist der Elastizitätsmodul bei dieser Geschwindigkeit zu ermitteln.

halten als der Photobond GB485, an der Rohrprobe ermittelt dagegen ein weiches Verhalten. Diese Diskrepanzen erfordern weitere Untersuchungen, inwieweit das Materialverhalten des Photobond GB485 bei Minustemperaturen durch die Füge­teile beeinflusst wird.

Ein Vergleich der Querdehnzahlen ist lediglich für Raumtemperatur möglich. Bei niedrigen und hohen Temperaturen ergaben sich keine aussagenkräftigen Werte bei der Untersuchung an Schulterstäben. An der Rohrprobe ermittelt, ergeben sich höhere Querdehnzahlen für beide Acrylate als aus den Substanzprüfkörpern. Dies entspricht den Erwartungen, da der Klebstoff in der Grenzschicht ein steiferes Verhalten zeigt als an einer Reinstoffprobe.

Letztendlich erweist es sich als sinnvoll, beide Methoden durchzuführen. An Substanzprüfkörpern können relativ unproblematisch Einflüsse aus Prüfgeschwindigkeit, Einlagerungsdauer oder Aushärtebedingungen auf das Materialverhalten untersucht werden. Diese Betrachtungen sollen den Anfang der Begutachtung des Materials bilden. Für Klebverbindungen mit Klebschichtdicken stärker als 1,0 mm ist die Kennwertermittlung an den Substanzprüfkörpern ausreichend. Bei der Ermittlung der elastischen Materialkennwerte an der Rohrprobe treten hierbei durch die Annahme einer behinderten Querdehnung zu hohe Ungenauigkeiten auf. Der Einfluss der Grenzschicht, deren Ausdehnung sich in Größenordnungen von nicht mehr als 15 µm bewegt, wird vernachlässigbar.

In-situ-Prüfkörper geben jedoch neben den Materialkennwerten die Versagensgrenze der Verbindung an. Werden die übertragbaren Adhäsionskräfte überschritten, so tritt ein Bruch ein. Das Versagen tritt bei in-situ-Prüfkörpern, die mit UV- und lighthärtenden Acrylaten geklebt wurden, bei deutlich geringen Dehnungen auf als bei Substanzprüfkörper, die durch Kohäsionsverlust versagen. Die aufnehmbaren Kräfte bei Klebverbindungen werden durch die Materialien der Füge­teile mitbestimmt.¹²³ Aus diesem Grunde dienen in-situ-Prüfkörpern dazu, Langzeiteinflüsse, durch die die Adhäsionskräfte beeinflusst werden, zu begutachten.

¹²³ Vergleiche hierzu Tasche 2007, S. 117.

9 Kleinteilversuche - Durchführung

9.1 Grundlagen

Im Zuge der vorangegangenen Forschung zu Glas-Metall-Klebungen unter Verwendung UV- und lichterhärtender Acrylatklebstoffe wurden Prüfkörper entwickelt, die gestatten, die Zug- und Schubfestigkeit verschiedener Materialkombinationen zu ermitteln.¹²⁴

Basierend auf das im Vorfeld gelaufene umfangreiche Versuchsprogramm wird für diese Arbeit der Umfang der Materialkombinationen begrenzt, um vertiefende Untersuchungen durchzuführen. Ziel dieser Versuche ist eine genaue Verformungsmessung nahe der Klebfuge, um das Verhalten des Klebstoffes in der Glas-Metall-Verbindung zu ermitteln. Wie in den vorangegangenen Kapiteln werden die beiden Acrylatklebstoffe Photobond 4468 und Photobond GB485 verwendet, um Floatglas mit Edelstahl zu fügen. Entsprechend einer potentiellen Anwendung im Konstruktiven Glasbau ist beim Edelstahl die Klebfläche mechanisch vorbehandelt, sie ist geschliffen beziehungsweise gedreht ausgeführt. Aus den beiden Materialkombinationen werden Zylinderzug- und Druckscherprüfkörper hergestellt, um sie bei Raumtemperatur, sowie bei tiefen und hohen Temperaturen zu prüfen.

Für die Untersuchungen wird auf handelsübliches Floatglas (Kalk-Natronsilicatglas) aus einer Charge zurückgegriffen. Die Oberfläche bleibt unbehandelt. Der Zuschnitt in die erforderlichen Größen erfolgt mit einer Wasserstrahl-Schneidanlage Trumpf Trumatic WS 2500. Ohne thermische Belastung können kleine Abmessungen in hoher Genauigkeit ge-

¹²⁴ Vergleiche hierzu Prautzsch 2005, Tasche 2007, Weller 2006, Weller 2007b. Sechs Acrylatklebstoffe wurden für die Verbindungen von Füge- teilen aus Floatglas und Metall verwendet. Dabei wurden als metalli- sche Füge- teile glanzverchromtes, mattverchromtes und pulverbe- schichtetes Messing, gedrehter, geschliffener und polierter Edelstahl sowie eloxiertes Aluminium eingesetzt. Diese Prüfkörperkombinationen wurden im Vergleich zur Anfangsfestigkeit einer künstlichen Alterung, bestehend aus Temperaturbelastung von -20 °C und +80 °C, SUN- Test, UV-Bestrahlung, Wasserlagerung, Salzsprühnebeltest, Reini- gungsmitteltest, SO₂-Belastung und Klimawechseltest unterzogen. Wei- terhin wurde der Einfluss angrenzender Materialien untersucht. Zum di- rekten Vergleich dieser Ergebnisse wurden Prüfkörper nach Lagerung in einem Freibewitterungsstand geprüft.

schnitten werden. Die Kantenqualität ist ausreichend, um die Glasfügeteile ohne weitere Bearbeitung zu verwenden.¹²⁵

9.2 Probengeometrie und Herstellung

9.2.1 Zylinderzugprüfkörper

In Anlehnung an EN 26922 wurde ein stumpf geklebter Prüfkörper entwickelt, bei dem eine Klebverbindung mit dem spröden Material Glas auf Zug belastet werden konnte. Dafür wurde ein Zylinder aus Metall mittig auf eine quadratische Floatglasscheibe geklebt.

Zylinder aus Edelstahl,
Klebfläche gedreht,
 $\varnothing = 20 \text{ mm}$
 $l = 50 \text{ mm}$

Acrylatklebstoff
Schichtdicke $d_k = 0,5 \text{ mm}$

Floatglas $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}$

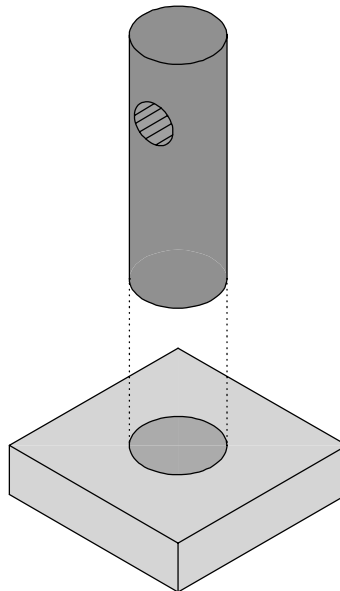


Bild 93 Explosionszeichnung des Zylinderzugprüfkörpers. Der Metallzylinder wird zentrisch auf eine quadratische Scheibe aus Floatglas geklebt. Verwendet wurden zwei lichthärtende Acrylatklebstoffe, Photobond 4468 und Photobond GB485 mit einer Schichtdicke von 0,5 mm.

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, war in der Vorbereitung ein konstanter Ablauf zum Erreichen einer gleichen Ausgangssituation einzuhalten. Es wurde stets die Atmosphärenseite des Glases als klebseitige Oberfläche vorgesehen.¹²⁶ Ein großes Augenmerk wurde auf die Reinigung gelegt, da selbst durch kleinste Verunreinigungen der Fügeteiloberflächen die Benetzung durch den Klebstoff vermindert wird und sich ein früheres Versagen unter Belas-

¹²⁵ Das Herstellen der Glasfügeteile durch beispielsweise Anritzen und Brechen hätte eine Nachbearbeitung der Kanten zur Verringerung der Verletzungsgefahr erfordert.

¹²⁶ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 116 f.

tung einstellen kann. Die Reinigung erfolgte jeweils nach einem zu Beginn festgelegten Ablauf.

Beginnend wurden die Füge Teile aus Glas zunächst in ein Ultraschallbad¹²⁷ mit Leitungswasser für eine Dauer von 5 Minuten gelegt. Anschließend wurde die Klebfläche mit einem fusselfreien Tuch abgetrocknet, um sie dann zum Entfetten mit Ethanol zu reinigen. Es folgte ein Ultraschallbad mit entionisiertem Wasser über einen Zeitraum von 5 Minuten. Nachdem die Klebfläche mit einem fusselfreien Tuch abgetrocknet wurde, kam die Glasscheibe zum vollständigen Trocknen mit der Klebseite nach oben für etwa 30 Minuten in einen Wärmeschrank bei 120 °C.

Die Klebfläche der Füge Teile aus Metall wurde mit einem Aceton getränktem Tuch gesäubert. Vor der Weiterverarbeitung war ein Zeitintervall von 5 Minuten zum Abdunsten einzuhalten.

Um die Klebstofffuge in der gewünschten Dicke herzustellen, wurde eine Fügevorrichtung mit digitalem Höhenmessgerät entwickelt.¹²⁸ So war es möglich, die Fugendicke ohne Hilfe von eingelegten Metalldrähten, Glaskugeln, Kunststoffschnüren oder sonstigen Hilfsmitteln herzustellen. Dadurch ergab sich eine ungestörte Klebfuge, die besonders bei diesen kleinteiligen Prüfkörpern für ein objektives Bild sorgte.

Der Metallzylinder wurde mit der Klebseite nach oben in eine Fügevorrichtung eingespannt und das damit verbundene digitale Messgerät bei Oberkante Zylinder auf Null gesetzt. Mit einem Dispenser wurde der Klebstoff auf den Metallzylinder aufgetragen. Um beim Klebstoffauftrag eine vollständig ausgefüllte Klebfläche mit einer möglichst kleinen Kehle zu erzielen, wurde der Klebstoff in einer festgelegten Tropfenanzahl aufgetragen. Je nach Zähigkeit des Klebstoffes war es erforderlich, die Tropfenanzahl zu variieren. Anschließend wurde der Arm der Vorrichtung mit der befestigten Glasplat-

¹²⁷ Die kleinteiligen Füge Teile werden in eine Flüssigkeit eingelegt, in der ein Ultraschallfeld erzeugt wird. Aus den dabei entstehenden Wellen wird Unter- und Überdruck erzeugt. Daraus ergeben sich lokale Druckspitzen, die eine Reinigung der Oberflächen bewirken. Vergleiche hierzu Weigel 2007, Seite 162.

¹²⁸ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 68 ff.

te bis zur Anzeige der gewünschten Fugendicke herab gefahren. In diesem Zustand, bei dem der Klebstoff noch nicht ausgehärtet war, wurde die gesamte Konstruktion unter die Lampe DELOLUX 03 geschoben. Durch eine mechanische Vorrichtung zur Halterung der Lampe konnte bei gleich bleibendem Abstand eine konstante Strahlungsintensität zur Aushärtung des Klebstoffes senkrecht durch die Floatglas-scheibe ermöglicht werden. Nach 40 Sekunden war die maximale Aushärtung erfolgt.

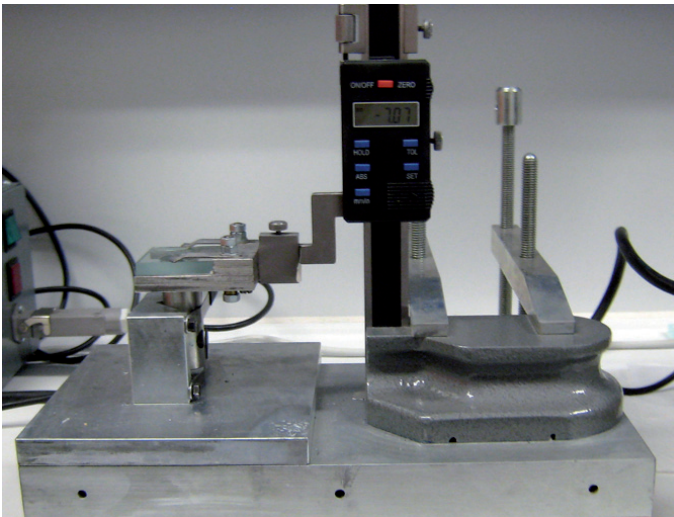


Bild 94 Fügevorrichtung mit digitalem Messgerät zum Herstellen des Probekörpers. Der untere Teil diente zum Einspannen des Metallzylinders. Am oberen Arm wurde die Glasplatte gehalten und nach Klebstoffauftrag auf den gewünschten Abstand heruntergefahren.



Bild 95 Dispenser zum kontrollierten Auftragen des Klebstoffes. Bei gleich bleibendem Druck wurde in Abhängigkeit von der Klebfugegeometrie und des Klebstoffes eine abgezählte Anzahl Klebstofftropfen auf das Fügeteil aufgetragen.

9.2.2 Druckscherprüfkörper

Der Druckscherprüfkörper wurde nach DELO-Norm 5 ausgeführt.¹²⁹ Die Materialien der Fügeteile und die Klebstoffe wurden entsprechend den Zylinderzugprüfkörpern gewählt. Die Überlappungslänge betrug 5 mm.

Floatglas 20 x 20 x 5 mm

Acrylatklebstoff
Schichtdicke $d_K = 0,5$ mm

Platte aus Edelstahl 20 x 20 x 5 mm
Kleblfläche geschliffen

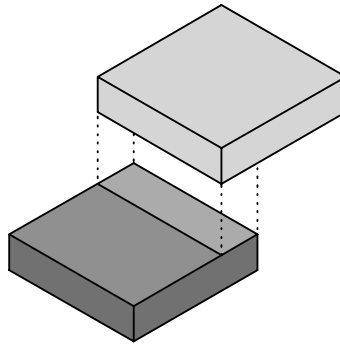


Bild 96 Explosionszeichnung des Druckscherprüfkörpers. Eine Platte aus Glas wurde auf eine Platte aus Metall mit einer definierten Überlappungslänge geklebt. Verwendet wurden die beiden Klebstoffe Photobond 4468 und Photobond GB485.

Wie bei den Zylinderzugprüfkörpern wurde auch bei diesen Prüfkörpern der Klebstoff auf die Atmosphärenseite des Glases aufgetragen. Die Reinigung erfolgte nach der gleichen Prozedur wie bei den Zylinderprüfkörpern. Zur Herstellung der Prüfkörper wurde eine weitere Vorrichtung entwickelt, die es erlaubte, eine definierte Schichtdicke ohne mechanische Abstandhalter herzustellen. Die Vorgehensweise ähnelte der des Herstellens der Zylinderprüfkörper. Das Aushärten mittels UV-Lampe erfolgte wie im vorherigen Kapitel beschrieben. Die längs laufende, schmale Klebfuge erwies sich durch ihre Geometrie anfälliger gegenüber Ungenauigkeiten in der Herstellung als die kreisförmige Klebung des Zylinderzugprüfkörpers. Erschwerend kam hinzu, dass die Ungenauigkeiten bei der Fertigung von Fügeteilen mit diesen kleinen Abmessungen deutlich erkennbar waren und teilweise zu nicht exakten Geometrien führten.

Bei der Protokollierung wurde neben den Abmessungen der Klebfuge auch die Richtung der Rillen des Edelstahlfügeteils notiert. Gleichwohl war in der Versuchsauswertung kein Einfluss der Schleifrichtung festzustellen.

¹²⁹ Eine nähere Erläuterung ist in Abschnitt 5.2 dieser Arbeit und in Weigel 2007, Seite 174 zu finden.

9.3 Versuchsdurchführung

9.3.1 Durchführung der Zylinderzugversuche

Die Durchführung der Prüfungen erfolgte im Klebtechnikum des Fraunhofer Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik an der Prüfmaschine Z 050 der Firma Zwick Roell, eine Universalprüfmaschine, die für Zug-, Druck- und Biegeversuche mit quasistatischer Beanspruchung einsetzbar ist. Alle Versuche wurden mit einer konstanten Dehnungsgeschwindigkeit bis zum Bruch gefahren. Neben der Versuchsdurchführung bei Raumtemperatur wurden, angelehnt an ETAG 002-1, die Probekörper bei einer Temperatur von -20 °C und $+60\text{ °C}$ ¹³⁰ der Prüfung unterzogen. Für die Messungen unter Temperaturbelastung wurde eine passende Temperierkammer über das Messgestänge geschoben und vor der Versuchsdurchführung zusammen mit den erforderlichen Zubehörteilen auf die gewünschte Temperatur gebracht. Die Prüfkörper weilten vorab 4 bis 6 Stunden in der Klimakammer.

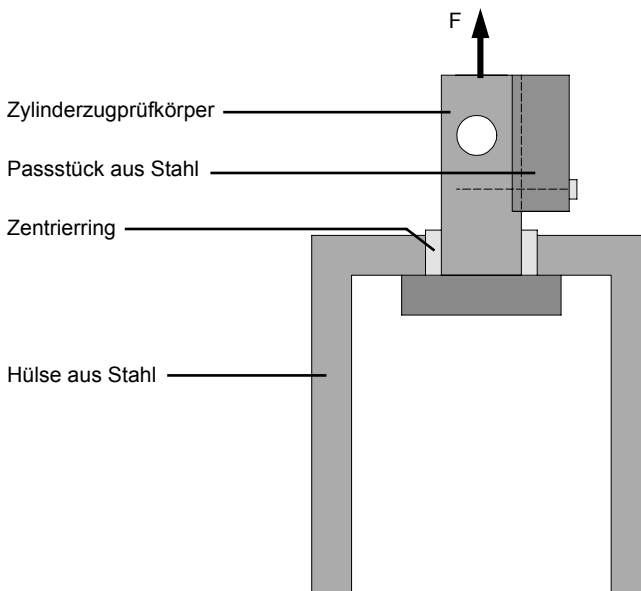


Bild 97 Zylinderzugprüfkörper mit Stahlhülse zur Halterung, Schnitt mittig durch den Aufbau. Das aufgeschraubte Passstück ermöglichte eine klebfugen-nahe Verformungsmessung. Zwischen Prüfkörper und Hülse wurde ein Zentrierring zur genauen Ausrichtung eingefügt.

Über den Zylinderprüfkörper wurde eine Stahlhülse geführt, die die Verbindung zum unteren Haltepunkt herstellte. In den oben herausschauenden Metallzylinder wurde über einen Bolzen eine Zugkraft eingeleitet. Dabei wurde die Glasplatte

¹³⁰ Hier musste von der Vorgabe von $+80\text{ °C}$ abgewichen werden, da diese Temperatur außerhalb des erlaubten Einsatzbereiches des Verformungsaufnehmers lag.

flächig an die Innenseite der Hülse gedrückt. Hierbei konnte bei der äußerst glatten Innenfläche der Stahlhülse auf eine Unterlegscheibe aus Teflon oder Pappe verzichtet werden.

Um die Verformungen möglichst klebfugennah zu messen, wurde an den Metallzylinder ein Passstück aus Edelstahl über eine Schraubverbindung angebracht. Zwischen Passstück und Stahlhülse konnte so ein Wegaufnehmer eingefügt werden. Verwendet wurde der Typ WAC der Firma Wazau, der für Messungen von Rissaufweitungen vorgesehen ist und für die Verformungsmessung an der dicken Zug-scherprobe nach EN 14869-2 eingesetzt wird.¹³¹ Die ursprünglich vorgesehenen zwei Schrauben zur Befestigung des Passstücks wurden im Laufe der Untersuchungen auf die untere reduziert, um eine eindeutige Aussage zur Verformung des Edelstahlzylinders treffen zu können.

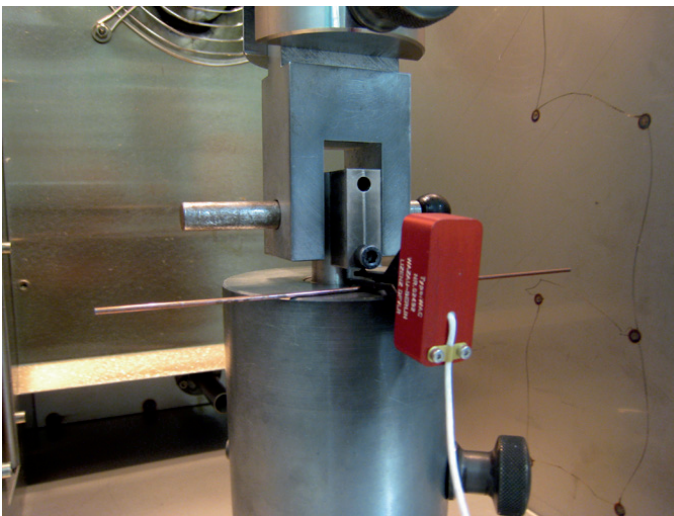


Bild 98 In die Prüfvorrichtung eingespannter Zylinderzugprüfkörper mit Temperierkammer. Der Wegaufnehmer ist zwischen Hülse und Passstück eingebaut, der eingelegte Draht sichert einen horizontalen Sitz.

Unter Zugbelastung ergab sich die gemessene Verformung als Vergrößerung des Abstandes zwischen Hülse und Passstück. Dabei flossen zusätzlich zu der Verformung der Klebschicht auch die Verformung des Zylinders und der Einfluss der Wölbung der Glasplatte in den Messwert ein. Die Verformung der Hülse hatte keinen Einfluss auf die gemessene, relative Verformung.

¹³¹ Bei der dicken Zugscherprobe wird der Wegaufnehmer in den Spalt zwischen den beiden Fügeteilen angeordnet. Die Verformungen können somit in unmittelbarer Nähe der Klebfuge gemessen werden. Vergleiche hierzu Kapitel 5.2.

9.3.2 Durchführung der Druckscherversuche

Die Druckscherversuche wurden gleichermaßen im Klebtechnikum des Fraunhofer Institutes für Werkstoff- und Strahltechnik an der Prüfmaschine Z 050 der Firma Zwick Roell durchgeführt. Der Prüfkörper wurde in eine Halterung eingebracht und die Lage über Teflonstreifen gesichert. Die Druckkraft wurde von oben über eine Hülse mit mittiger Verstärkung in den Prüfkörper eingeleitet. Beim Einlegen in die Versuchsvorrichtung wurde stets das Fügeteil aus Glas nach unten gelegt. Da auch hier zur genauen Verformungsaufnahme auf eine weiche Lage zwischen Glas und Metall verzichtet wurde, kam es in einigen wenigen Fällen zum Abplatzen einer Glasecke oder zum vorzeitigen Versagen durch Glasbruch.

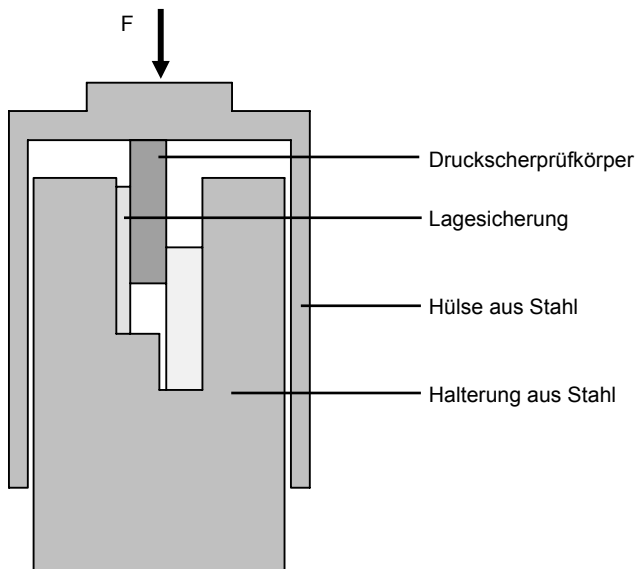


Bild 99 Druckscherprüfkörper mit umfassender Stahlhülse und Halterung. Gezeigt ist ein Schnitt mittig durch den Aufbau. Die Druckkraft wird über die Hülse in das obere Fügeteil aus Metall eingeleitet. Zur Lagesicherung des Prüfkörpers dienen Teflonstreifen.

Der Wegaufnehmer, Typ WAC der Firma Wazau, wurde zwischen Hülse und unterem Festlager angeordnet. Die gemessene Verformung als Verringerung des Abstandes beinhaltet neben der Verformung der Klebschicht auch die Verformung der Fügeteile sowie die Stauchung der Halterung und des oberen Teils der Stahlhülse.

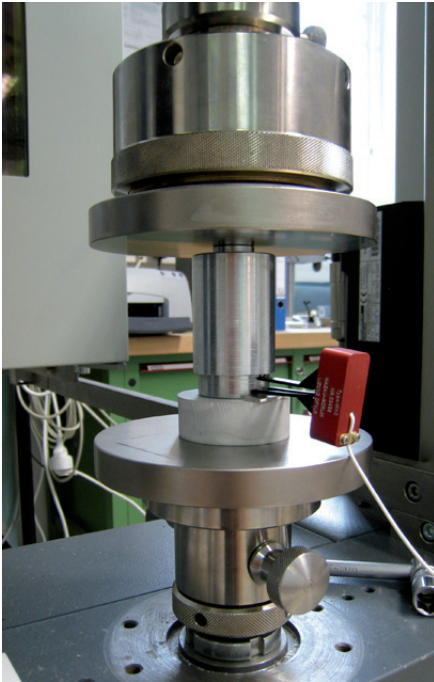


Bild 100 Aufbau zur Durchführung des Druckscherversuchs. Der Prüfkörper ist von der Hülse umschlossen und deshalb nicht sichtbar. Der Wegaufnehmer ist zwischen Hülse und unterem Lager eingefügt.

9.4 Auswertung

Zur Auswertung der Versuche wurde die von der Prüfmaschine aufgebrachte Kraft zusammen mit der Messung des Verformungsaufnehmers aufgezeichnet. Dabei wurde jeweils die Fügeteilverformung berücksichtigt und von den Verformungswerten abgezogen.

Bei den Zugversuchen wurden die Messwerte des Wegaufnehmers um die Längenänderung des Metallzylinders und die Wölbung der Glasscheibe reduziert. Die Berechnung der Zylinderverformung hat die Länge zwischen klebseitiger Oberfläche und der Schraube, die das Passstück hält, als Grundlage. Die Verformung des oberen Teils des Metallzylinders hatte keinen Einfluss auf die Verformungsmessung des Wegaufnehmers. Die Glasscheibe wird an die innere Fläche der Hülse gepresst. Hier werden lediglich Druckkräfte übertragen, die Glasscheibe wölbt sich nach oben.¹³² Dazu wird an den Randpunkten der Klebfläche aus der FE-

¹³² Vergleiche hierzu Kapitel 10.

Berechnung die Wölbung der Glasscheibe in Kraftrichtung ermittelt und von der gemessenen Verformung abgezogen.

Die Klebfuge von jedem Prüfkörper wurde mit Fläche und Dicke dokumentiert und in der Spannungs- und Dehnungsberechnung berücksichtigt. Die dargestellten Dehnungswerte beziehen sich jeweils auf die ursprüngliche Schichtdicke der Klebfuge. Aus der gemessenen Kraft F und der Fläche A wird die Zugspannung σ in der Klebfuge unter Annahme einer gleichmäßigen Spannungsverteilung ermittelt.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Gleichung 31

mit:

$$\begin{aligned}\sigma &= \text{Zugspannung in [N/mm}^2\text{]} \\ F &= \text{Zugkraft in [N]} \\ A &= \text{Klebfäche in [mm}^2\text{]}\end{aligned}$$

Die Dehnung ε wird auf die ursprüngliche Klebfugendicke d_K bezogen.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{d_K}$$

Gleichung 32

mit:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \text{Dehnung in [\%]} \\ \Delta l &= \text{Verschiebung in [mm]} \\ d_K &= \text{Klebfugendicke in [mm]}\end{aligned}$$

Bei der Auswertung der Druckscherversuche wurde ebenfalls die Fügeiteilverformung abgezogen. Dabei flossen neben dem Zusammenstauchen des Glas- und Metallfügeteiles zusätzlich die Stauchung der Halterung und der Hülse im Druckbereich ein. Für die Spannungs- und Gleitungsberechnung wurde vor Versuchsbeginn die Klebfuge mit Länge, Breite und Dicke gemessen. Aus der gemessenen Kraft F und der Klebfäche A wird die Schubspannung τ berechnet,

wobei eine gleichmäßig über die Klebfläche verteilte Schubspannung angenommen wird.¹³³

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{F}{l_{\text{Ü}} \cdot b_{\text{K}}}$$

Gleichung 33

mit:

- τ = Schubspannung in [N/mm²]
- F = Druckkraft in [N]
- A = Klebfläche in [mm²]
- $l_{\text{Ü}}$ = Überlappungslänge in [mm]
- b_{K} = Breite der Klebfuge in [mm]

Die Gleitung γ wird auf die Klebfugendicke d_{K} bezogen.

$$\gamma = \arctan \frac{\Delta l}{d_{\text{K}}}$$

Gleichung 34

mit:

- γ = Gleitung
- Δl = Verschiebung in [mm]
- d_{K} = Klebfugendicke in [mm]

Die Auswertung der Versuchsergebnisse muss auf die Prüfungen bei Raumtemperatur beschränkt werden. Die Versuche bei -20 °C und +60 °C lieferten leider keine aussagekräftigen Ergebnisse. Die Verformungsmessung zeigte sich besonders im Anfangsbereich als nicht ausreichend. Dazu sollen im Rahmen weiterer Forschung diese Versuche mit einer verbesserten Verformungsmessung wiederholt werden. Gleichwohl konnte das temperaturabhängige Verhalten

¹³³ Die Annahme liefert eine idealisierte Spannungsverteilung. Diese Darstellung mit gleichmäßig über die Fläche verteilten Schubspannungen dient vorzugsweise zur Ermittlung der maximalen Druckscherfestigkeit. In Wirklichkeit steigen die Schubspannungen an den Rändern an, vergleiche Kapitel 10.2. Einen ersten Berechnungsansatz lieferte Volkersen bereits 1938 für einfach überlappte schubbeanspruchte Nietverbindungen. Vergleiche hierzu Volkersen 1938 und Volkersen 1953. Für die Berechnung wurden dabei die Niete durch eine gleichmäßig ausgebreitete ideale Verbindungsschicht ersetzt. Dies entspricht somit dem Modell einer Klebschicht. Einige vereinfachende Annahmen veranlassten Goland und Reissner zu einer Weiterentwicklung des Ansatzes. Weitere folgen, die ein nichtlineares Spannungs-Verformungs-Verhalten der Klebschicht einbeziehen. Vergleiche Habenicht 2006, Seite 450 ff. und Schadow 2006, Seite 41 f.

der Klebstoffe bestätigt werden. Hohe Temperaturen erzeugten ein äußerst nachgiebiges Verhalten des Materials. Tiefe Temperaturen ließen die Prüfkörper schlagartig versagen.

Eine Versuchsreihe bestand aus mindestens 5 Prüfkörpern. Aus den gemessenen Festigkeiten wurde der arithmetische Mittelwert gebildet und die Standardabweichung als Maß der Streuung ermittelt. Die Bruchbilder, auch die der Versuche unter Temperaturbelastung, wurden aufgenommen, um Aussagen über das Versagen zu ermöglichen.

9.5 Ergebnisse für beide Klebstoffe

Beide Klebstoffe zeigen in ihrer Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung einen nahezu linearen Kurvenverlauf. Die Mittelwerte der Bruchspannungen haben etwa das gleiche Niveau. Die dazugehörige Standardabweichung liegt beim Photobond GB485 niedriger. Die Bruchdehnungen für den Photobond 4468 liegen im Mittel bei etwa 1,5 %. Auffällig ist die große Streuung der Dehnungswerte des Photobonds GB485, die Bruchdehnungen reichen von 1,4 % bis 3,8 %. Des Weiteren zeigen zwei Kurvenverläufe gegen Ende Spannungseinbrüche, die auf ein schrittweises Versagen der Klebverbindung hinweisen. Diese 'Zacken' befinden sich etwa in Höhe der Bruchspannungen der restlichen Kurven. Insgesamt fällt die Steigung beim Photobond GB485 etwas flacher als bei Photobond 4468 aus.

In der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung beginnen beide Klebstoffe mit einem linearen Kurvenanstieg. Nach dem Erreichen der Streckgrenze fallen beim Photobond 4468 die Spannungen ab, bevor sie wieder einen Anstieg bis zum Bruch verzeichnen. Der Photobond GB485 hingegen zeigt nach dem linearen Anstieg einen Übergang zum Fließen mit einem weiteren Spannungsanstieg. Die Bruchspannungen und die Standardabweichungen sind bei Photobond 4468 deutlich höher als beim Photobond GB485. Die Bruchgleitungen haben etwa die gleiche Größenordnung. Beim Photobond 4468 fällt die Steigung des ersten linearen Bereichs steiler aus, der Übergang zum plastischen Verhalten ist bei höheren Schubspannungen festzustellen.

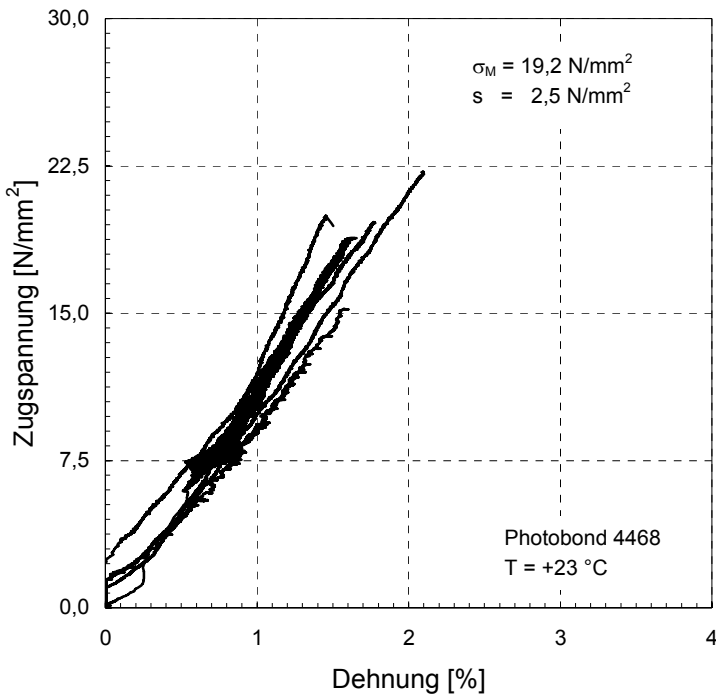


Bild 101 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur, Klebfugendicke 0,5 mm. Das 'Rauschen' der Versuchsergebnisse ist auf Regelprobleme zurückzuführen. Die Mittelwerte und Standardabweichungen beziehen sich auf die Bruchspannungen. Bis zum Auftreten des Bruches kann man von einem linearen Verhalten der Klebstoffverbindung ausgehen.

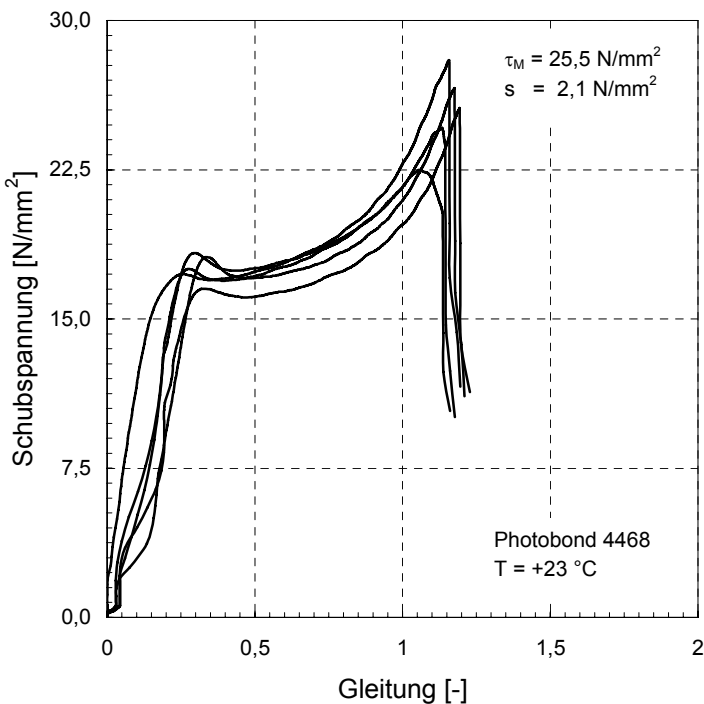


Bild 102 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond 4468 bei Raumtemperatur, Klebfugendicke 0,5 mm. Idealisiert kann man von einem linearen Verhalten im Anfangsbereich ausgehen. Nach Erreichen der Streckgrenze beginnt der Klebstoff zu fließen, bis er sich weiter verfestigt und schließlich versagt.

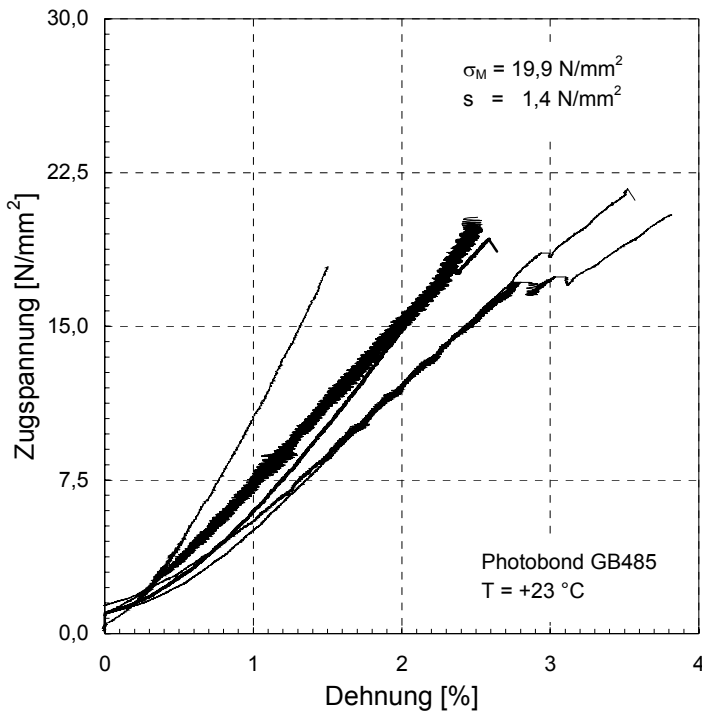


Bild 103 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei Raumtemperatur, Klebfugendicke 0,5 mm. Das 'Rauschen' im Kurvenverlauf ist auf Regelprobleme zurückzuführen. Die Spannungseinbrüche bei zwei Kurvenverläufen deuten auf ein schrittweises Versagen der Klebverbindung hin. Nach einem von der Verformungsmessung problematischen Anfangsbereich zeigte sich ein nahezu linearer Spannungsverlauf bis zum Bruch.

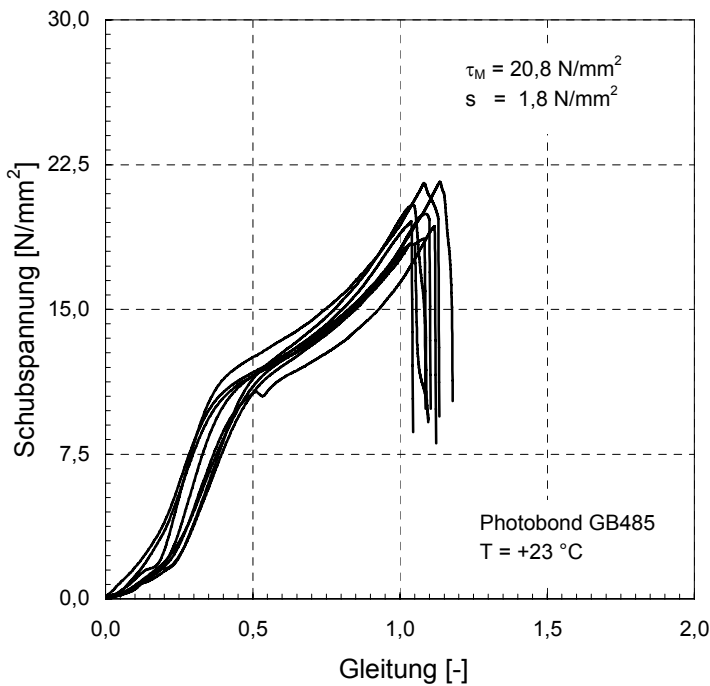


Bild 104 Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung für den Photobond GB485 bei Raumtemperatur, Klebfugendicke 0,5 mm. Diese Versuchsreihe besteht aus zehn Versuchen. Da die Verformungsmessung gerade im Anfangsbereich schwierig war, sollten diese Versuche mit einem anderen Messsystem wiederholt werden.

Betrachtet man die Bruchbilder, fallen deutliche Unterschiede auf. Unter Zugbelastung zeigte der Photobond 4468 ein wechselseitiges Adhäsionsversagen mit unterschiedlich groß ausgeprägten kohäsiven Übergangsbereichen. Luftbläschen beeinflussten sichtbar das Bruchbild. Beim Photobond GB485 war ein eindeutiges metallseitiges Adhäsionsversagen festzustellen. Lufteinschlüsse schienen keinen Einfluss auf das Bruchbild und somit auf das Versagen zu haben.

Die Bruchbilder der Prüfkörper, die bei -20 °C gelagert und geprüft wurden, zeigten für beide Klebstoffe ein wechselseitiges Adhäsionsversagen. Dabei wies der kohäsive Übergangsbereich beim Photobond 4468 einen unruhigeren Verlauf als beim Photobond GB485 auf.

Bei +60 °C nahmen die Prüfkörper keine weitere Last auf, wurden aber größtenteils nicht auseinandergerissen. Auch hier zeigten sich Unterschiede der beiden Klebstoffe. Der Photobond 4468 löste sich punktuell ab, wobei sich eine Art 'Fadenziehen' andeutete. Beim Photobond GB485 konnte dieses Verhalten nicht beobachtet werden. Dagegen wies dieser Klebstoff nahezu ausschließlich ein adhäsives Versagen auf der Metallseite auf. Die Prüfkörper hingen noch zusammen, konnten jedoch mit geringem Kraftaufwand auseinander genommen werden.

Die Druckscherprüfkörper zeigten für beide Klebstoffe einen eindeutigen Adhäsionsverlust auf der Metalloberfläche. Obwohl einige nicht auseinander brachen, konnten diese trotzdem keine weiteren Kräfte aufnehmen. Hervorgerufen durch Delaminationserscheinungen auf der metallseitigen Oberfläche zeigten diese Klebfugen eine unterschiedliche Färbung der Klebfläche. Das Versagen schien hier von den Rändern beziehungsweise vom freien Rand des Metallfügeteils auszugehen. Der mittige Bereich - dunkler in der Tönung - wurde durch schwache Kräfte noch zusammengehalten.

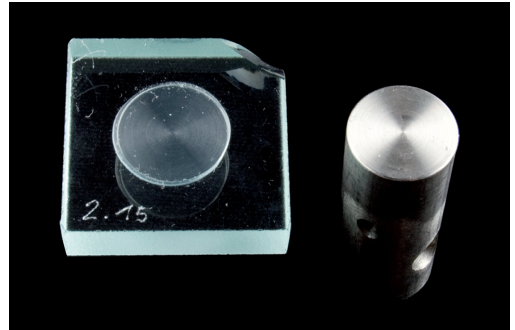
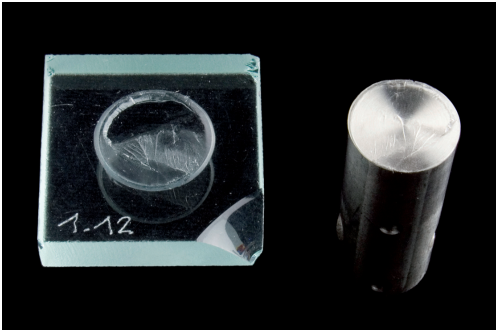


Bild 105 Typisches Bruchbild des Photobonds 4468 (links) und des Photobonds GB485 (rechts) bei +23 °C.

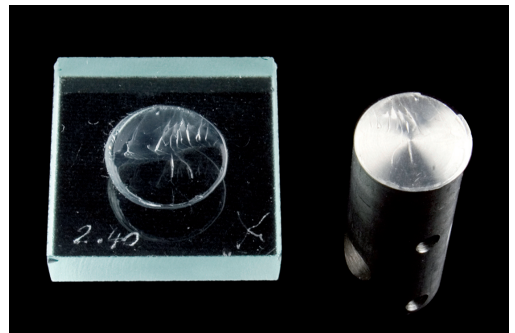
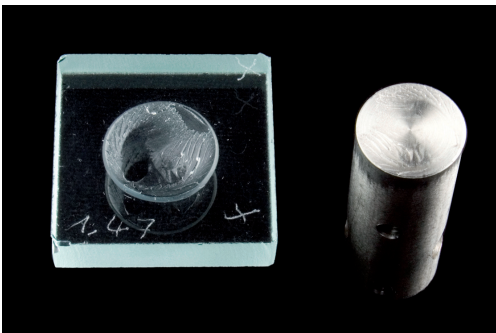


Bild 106 Typisches Bruchbild des Photobonds 4468 (links) und des Photobonds GB485 (rechts) bei -20 °C.

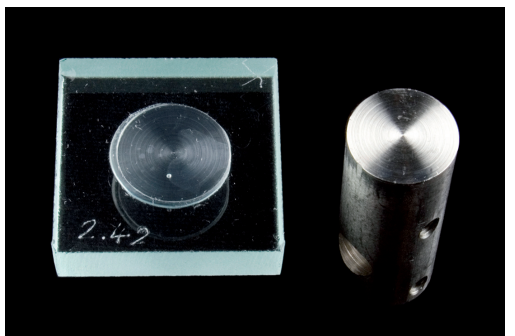
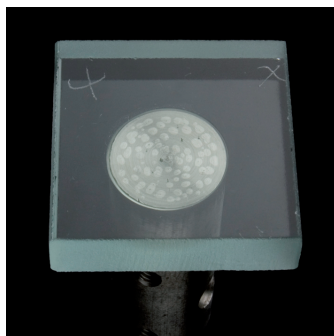


Bild 107 Typisches Bruchbild des Photobonds 4468 (links) und des Photobonds GB485 (rechts) bei +60 °C.

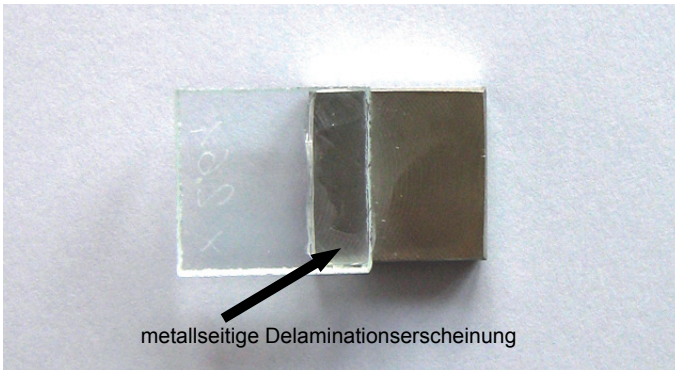


Bild 108 Druckscherprüfkörper nach Beendigung der Prüfung. Es konnte keine weitere Last aufgenommen werden, obwohl die Fügeteile noch aneinander hafteten. Erkennbar die unterschiedliche Tönung in der Klebfuge als Hinweis auf metallseitigen Ablöseerscheinungen.

Im Folgenden werden aus den erzielten Festigkeitswerten die zulässigen Spannungen ermittelt.¹³⁴ Dies erfolgt in Anlehnung an die übliche Vorgehensweise im Flugzeugbau und an die Empfehlungen für tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen.¹³⁵

Ausgangspunkt ist die charakteristische Bruchspannung $R_{u,5}$.

$$R_{u,5} = x_M - \tau_{a\beta} \cdot s$$

Gleichung 35

mit

$R_{u,5}$ Charakteristische Bruchspannung mit einer 75 %-igen Wahrscheinlichkeit, dass 95 % der Versuchsergebnisse über diesem Wert liegen

x_M mittlere Bruchspannung einer Serie

$\tau_{a\beta}$ ¹³⁶ Exzentrizität von 5 % mit 75 % Wahrscheinlichkeit
2,46 für 5 Prüfkörper
2,10 für 10 Prüfkörper

s Standardabweichung der betrachteten Versuchsreihe

¹³⁴ Vergleiche hierzu ETAG 002-1, Seite 47 f. Für Silikone wird ein allgemeiner Abminderungsfaktor von 1/6 ohne Aufschlüsselung in einzelne Faktoren vorgegeben.

¹³⁵ Vergleiche hierzu BÜV 2002, Habenicht 2006, Seite 498, Peters 2006, Seite 143 f. und Tasche 2007, Seite 151. Ein semiprobabilistisches Sicherheitskonzept wird in Schadow 2006, Seite 33 ff. erläutert.

¹³⁶ Vergleiche hierzu ETAG 002-1, Tabelle 7, Seite 48.

Die zulässige Spannung σ_{zul} ergibt sich aus der charakteristischen Bruchspannung $R_{u,5(AF23)}^{137}$, die mit den erforderlichen Abminderungsfaktoren reduziert wird. Diese berücksichtigen Einflüsse aus Alterung, Temperatur und sonstigen möglichen Unregelmäßigkeiten.

$$\sigma_{zul} = k_{ges} \cdot R_{u,5(AF23)}$$

Gleichung 36

$$k_{ges} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5$$

Gleichung 37

mit

k_1 Abminderungsfaktor bei Temperaturbeanspruchung von +80 °C

$$k_1 = \frac{R_{u,5(RF80)}}{R_{u,5(AF23)}} \leq 1,0$$

Gleichung 38

k_2 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Alterung. Der ungünstigste Wert ist maßgebend.

$$k_2 = \frac{R_{u,5(RF)}}{R_{u,5(AF23)}} \leq 1,0$$

Gleichung 39

k_3 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Kriechneigung

$$k_3 = 0,80 \quad (\text{geringe Kriechneigung})^{138}$$

¹³⁷ Die Bezeichnungen basieren auf den Festlegungen aus den Alterungstests. AF23 bezeichnet die Anfangsfestigkeit bei 23 °C, RF80 die Restfestigkeit bei 80 °C und RF die Restfestigkeit allgemein. Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 113.

¹³⁸ In Peters 2006, Seite 143 wurden die Klebstoffe nach der Kriechneigung eingeteilt: Klebstoffe mit hoher Kriechneigung ($k_3 = 0,25$), Klebstoffe mit mittlerer Kriechneigung ($k_3 = 0,5$) und Klebstoffe mit geringer Kriechneigung ($k_3 = 0,8$). Aus den Zeitstandversuchen folgernd kann für Acrylatklebstoffe eine geringe Kriechneigung angesetzt werden. Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 153 ff.

k_4 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der reduzierten Produktionsqualität im Vergleich zu Laborbedingungen

$$k_4 = 0,80$$

k_5 Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Schwankungen von Materialeigenschaften sowie Unsicherheiten in den Berechnungsmethoden

$$k_5 = 0,66$$

Da die durchgeführten Versuche nur für statische Kurzzeitbelastung und für Raumtemperatur ausgewertet werden, kann auf die Abminderung durch Temperatur, Alterung und Kriechen verzichtet werden. Somit werden lediglich die Faktoren k_4 und k_5 angesetzt.¹³⁹

		Photobond 4468		Photobond GB485	
		Zug	Schub	Zug	Schub
x_M	[N/mm ²]	19,2	25,5	19,9	20,8
s	[N/mm ²]	2,5	2,1	1,4	1,8
$\tau_{a\beta}$		2,46	2,46	2,46	2,10
$R_{u,5}$	[N/mm ²]	13,1	20,3	16,5	17,0
k_4		0,80	0,80	0,80	0,80
k_5		0,66	0,66	0,66	0,66
zul σ, τ	[N/mm²]	6,9	10,7	8,7	9,0

Tafel 14 Ermittlung der zulässigen Spannungen für statische Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur.

Es zeigt sich, dass die zulässigen Zugspannungen für statische Kurzzeitversuche bei Raumtemperatur für den Photobond GB485 um 26 % höher liegen als die des Photobonds 4468. Bei Betrachtung der zulässigen Schubspannungen kehrt sich das Verhältnis um. Hier liegt die Grenze

¹³⁹ Zulässige Spannungen für verschiedene Materialkombinationen und Alterungseinflüsse wurden in Tasche 2007, Seite 151 ff. ermittelt.

für den Photobond 4468 um etwa 19 % höher als beim Photobond GB485.

Diese Werte sind als Richtwerte anzusehen, die aus diesen Versuchsserien mit der vorhandenen Probenanzahl und den gewählten Geometrien abgeleitet wurden. Sie dienen vorrangig zum Vergleich untereinander und zur Bestätigung der folgenden FE-Berechnung.

9.6 Vergleich mit Ergebnissen aus der Rohrprobe

Sowohl die Zylinderzug- und Druckscherprüfkörper als auch die Prüfkörper für die Rohrprobe wurden mit gleichen Eingabeparametern versehen. Verwendet wurden neben den gleichen Klebstoffen die gleiche Klebschichtdicke von 0,5 mm und ein identisches Aushärteverfahren. Dennoch sind besonders in den Bruchlasten die Abweichungen eindeutig.

Bei dem Photobond 4468 unter Zugbelastung ist bei beiden Prüfkörpertypen ein nahezu linearer Verlauf erkennbar. Die Bruchspannung liegt bei der Rohrprobe nahezu konstant bei 15 N/mm^2 , während die Bruchspannungen der Zylinderzugprüfkörper um einen Mittelwert von $19,2 \text{ N/mm}^2$ schwanken. Auch die Bruchdehnungen liegen hier etwas höher. An der Rohrprobe ergibt sich eine geringfügig steilere Steigung der Kurven. Auffallend sind dagegen die Unterschiede in den Schubspannungs-Gleitungs-Kurven. Die Versuche der Druckscherprüfkörper zeigen eine deutlich höher ansteigende Anfangslinearität, erst bei Spannungen von etwa 17 N/mm^2 beginnt das plastische Verhalten. Danach steigen die aufnehmbaren Spannungen weiter an, während bei der Rohrprobe nur eine geringfügige Verfestigung eintritt. Die an den Druckscherprüfkörpern ermittelten Bruchspannungen liegen deutlich steiler als diejenigen, die an der Rohrprobe auftreten.

Die Zugspannungs-Dehnungs-Beziehungen des Photobonds GB485 zeigen bei den Rohrproben niedrigere Bruchspannungen und Bruchdehnungen als bei den Zylinderzugprüfkörpern. Die Steigungen der Kurven, die an der Rohrprobe ermittelt wurden, sind höher als bei den Zylinderzugprüfkörpern. Die Schubspannungs-Gleitungs-Diagramme zeigen - wie beim Photobond 4468 - markante Unterschiede. Der Übergang zum Fließen tritt bei den Druckscherprüfkörpern

pern erst bei doppelten Spannungswerten auf, die Bruchspannungen erzielen ebenfalls die doppelten Werte. Insgesamt zeigen die Kurven der Rohrprobe für beide Klebstoffe und beide Belastungsarten ein gleichmäßigeres Erscheinungsbild mit reproduzierbaren Ergebnissen. Dies zeugt von gleichförmigen Klebfugengeometrien. Bei den kleinteiligen Prüfkörpern fallen durch die geringen Abmessungen etwaige Abweichungen von der 'perfekten' Geometrie besonders ins Gewicht und verursachen die großen Streuungen.

Für das unterschiedliche Bruchspannungsniveau - die Prüfkörper der Rohrprobe versagten jeweils bei geringeren Lasten - scheinen Unterschiede in der Versuchssteuerung verantwortlich zu sein. Wie bei den Untersuchungen an den Substanzprüfkörpern festgestellt wurde, hat die Belastungsgeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf die Bruchspannung beziehungsweise auf die Streckspannung.

9.7 Freibewitterung

Auf dem Dach des Beyer-Baus der Technischen Universität Dresden wurde Zylinderzug- und Druckscherprüfkörper im Freien gelagert. Eine spezielle Vorrichtung dient dazu, die Prüfkörper vollständig der medialen Belastung, bestehend aus Feuchtigkeit, Regen, Schnee, Eis, und UV-Strahlung, auszusetzen.¹⁴⁰ Dabei ist die Klebfläche um 45° nach Süden geneigt. Die Konstruktion wurde so ausgelegt, dass keine Feuchtigkeit die Klebfuge über einen längeren Zeitraum beansprucht. Eine kurzfristige Ansammlung von Feuchtigkeit bis zum Abtrocknen ist unvermeidbar und entspricht den realen Bedingungen einer Anwendung, beispielsweise in einer Fassadenkonstruktion.

Zwei Ziele werden mit dieser Vorgehensweise verfolgt. Zum einen ermöglicht eine Auslagerung unter realen klimatischen Einsatzbedingungen den direkten Vergleich zur den Ergebnissen aus künstlicher Alterung. Zum anderen hilft eine Do-

¹⁴⁰ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 89 f.

kumentation der Klebfugen, Veränderungen festzustellen und Schadensursachen einzugrenzen.¹⁴¹



Bild 109 Zylinderzug- und Druckscherprüfkörper im Freibewitterungsstand auf dem Dach des Beyer-Baus der Technischen Universität Dresden. Die Prüfkörper werden in regelmäßigen Abständen visuell auf Veränderungen untersucht. Im Jahresrhythmus werden sie geprüft und die Festigkeiten verglichen.

Trotz der zweijährigen Auslagerungszeit sind an keinem Prüfkörper farbliche oder strukturelle Veränderungen der Klebfuge festzustellen.¹⁴² Exemplarisch wird ein Zylinderzugprüfkörper kurz nach Einbau und nach etwa 20 Monaten Freibewitterung gegenübergestellt. Die Luftbläschen, die durch den Herstellungsprozess in der Klebfuge erzeugt wurden, erscheinen unverändert.

¹⁴¹ Kapitel 11.2.7 beinhaltet eine Dokumentation zweier Überkopfverglasungen, die im Freien lagern. An einigen Klebfugen traten deutliche Veränderungen auf, die auf eine Delamination zurückzuführen sind. Durch die Freibewitterung der Kleinteilversuche kann ein Versagen des Klebstoffes durch klimatische Veränderungen ausgeschlossen werden. Den Schädigungen liegen andere Ursachen zu Grunde.

¹⁴² Die Sonnenlichtbeständigkeit wird anhand von Klebstoffproben nachgewiesen, die sich für 1000 h in einem Simulator befinden. Die Lichtechtheit wird mit einem L,a,b-Farbmessgerät gemessen. Die b-Farbkoordinate stellt ein direktes Maß für die Gelbfärbung dar. Im Vergleich zu anderen handelsüblichen strahlungshärtenden Klebstoffen ergeben sich für den Photobond 4468 mit 2,7 und für den Photobond GB485 mit 3,1 sehr geringe Werte. Dies zeugt von einer guten Sonnenlichtbeständigkeit. Vergleiche hierzu Witek 2004, Seite 103.

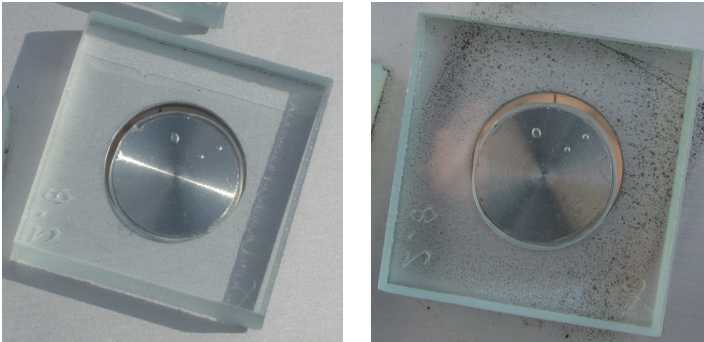


Bild 110 Zylinderzugprüfkörper kurz nach dem Einbau im Freibewitterungsstand (links). Nach etwa 20 Monaten in der Freibewitterung (rechts) zeigt sich keine Veränderungen in der Farbe oder Struktur der Klebfuge. Die Luftblasen sind in Lage und Größe unverändert geblieben.

Ein Vergleich der Festigkeiten, direkt nach Herstellung und nach einem Jahr Freibewitterung, zeigte abweichende Ergebnisse.¹⁴³ Unter Zugbelastung zeigte sich ein erhöhter Festigkeitsabfall für die Klebstoffe Photobond 4468 und Photobond VE 55727 auf Edelstahl und eloxiertem Aluminium. Klebverbindungen mit dem Photobond GB485 wiesen hingegen einen Festigkeitsanstieg auf. Die Druckscherprüfkörper, die mit dem Photobond 4468 geklebt wurden, zeigten in Kombination mit verschiedenen Metallen einen deutlichen Festigkeitsabfall. Deshalb sollte untersucht werden, inwieweit die Alterungsbeständigkeit durch Oberflächenvorbehandlungsverfahren verbessert werden kann.¹⁴⁴

¹⁴³ Vergleiche hierzu Weller 2008a. Zusätzlich zu den in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffen wurden weitere Acrylate verwendet, unter anderem der erwähnte Photobond VE 55727.

¹⁴⁴ Vergleiche hierzu beispielsweise Geiß 2008.

10 Kleinteilversuche - Berechnung

10.1 Zylinderzugversuch

10.1.1 Dreidimensionale Modellierung

Kleinteilige Prüfkörper für die Zylinderzugversuche, Glas-Metall-Prüfkörper mit den Acrylatklebstoffen Photobond 4468 und Photobond GB485, werden unter Verwendung des Finite-Elemente-Programm ANSYS® 11.0 abgebildet. Die Materialkennwerte für die Fügeteile Edelstahl und Glas sind allgemein bekannt. Für die beiden Acrylatklebstoffe wurden die Kennwerte an der Rohrprobe ermittelt.¹⁴⁵

Mit Hilfe eines dreidimensionalen Modells wird der Zylinderprüfkörper, bestehend aus den Materialien Glas, Klebstoff und Edelstahl abgebildet. Das komplette System wird aus Elementen des Typs Solid 185 aufgebaut.¹⁴⁶ Dies sind Elemente mit einer linearen Ansatzfunktion, bestehend aus 8 Knoten mit je drei Freiheitsgraden. Die untersuchten Acrylate zeigten bei den durchgeführten Versuchen an den Substanzprüfkörpern, an der Rohrprobe und an den Zylinderzugprüfkörpern ein lineares Anfangsverhalten. Da die Berechnung den baupraktisch relevanten Bereich bis zu den zulässigen Spannungen abbilden soll, wird entsprechend den Versuchen ein linear-elastisches Materialgesetz für die Berechnung verwendet. Eine Berechnung darüber hinaus mit Betrachtung des Versagens erfolgt in dieser Arbeit nicht. Größtenteils tritt ein ein- oder wechselseitiges Adhäsionsversagen auf, das Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein soll.¹⁴⁷

Der Zylinderzugprüfkörper wird verkürzt von der Glasscheibe bis zu der Verschraubung des Passstückes abgebildet. Während des Versuchs erfolgte die Verformungsmessung mit einem externen Wegaufnehmer, der zwischen Hülse und Passstück eingesetzt wurde. Die gemessene Verformung

¹⁴⁵ Vergleiche hierzu Kapitel 8.

¹⁴⁶ Vergleiche hierzu CADFEM 2005. Diese Elemente mit linearer Ansatzfunktion eignen sich für unterschiedliche Klebstoffsysteme, da sie zum Beispiel auch das hyperelastische Verhalten von Silikonen abbilden können. Andere Anbindungsvarianten wie, Target und Contact Elemente, führten hier nicht zu einer Verbesserung der Ergebnisse.

¹⁴⁷ Zur Betrachtung der Adhäsion innerhalb einer FE-Berechnung vergleiche hierzu Dollhofer 2001, Handing 2006, Possart 2005.

setzt sich aus mehreren Anteilen zusammen. Neben der Verformung der Klebschicht ist die Verformung der Glasscheibe infolge Wölbung und die Dehnung des Metallzylinders von Glasscheibe bis zur Schraube des Passstücks zu berücksichtigen. Die Hülse aus Metall wölbt sich beim Aufbringen der Zugbelastung ebenfalls nach oben. Da aber der Verformungsmesser auf der Hülse sitzt, bewegt er sich mit ihr, so dass die Verformung der Hülse nicht in die Messwerte einfließt.

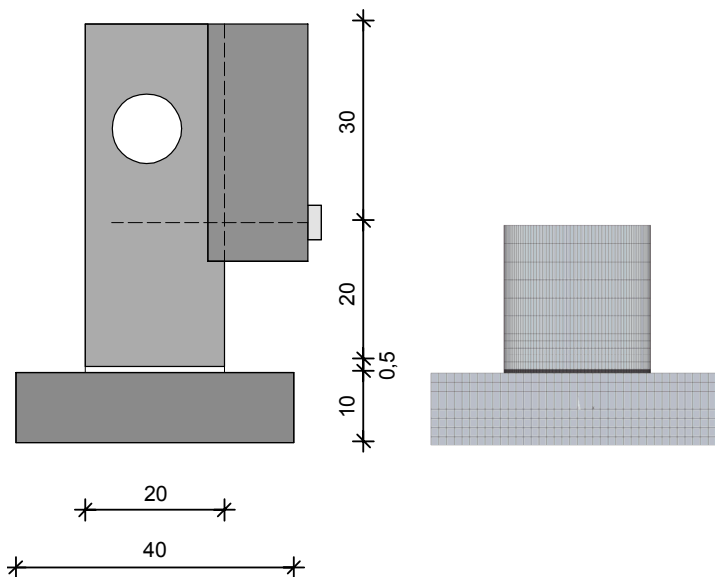


Bild 111 Zylinderzugprüfkörper. Links der Prüfkörper mit aufgeschraubtem Passstück, rechts die Modellierung für die Finite-Elemente-Berechnung mit verkürztem Metallzylinder. Die Klebfuge ist unmaßstäblich dargestellt.

Maße in [mm]

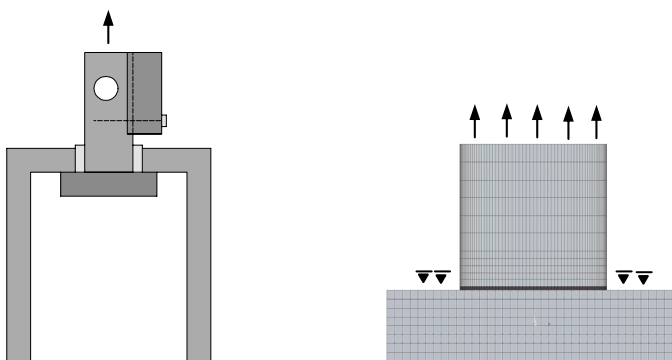


Bild 112 Auflagerbedingungen und Belastung des Systems im Versuch (links) und im Modell (rechts). Die Auflagerstellen der Glasscheibe sind nur auszugsweise dargestellt.

Die Lagerung des Zylinderzugprüfkörpers in der Berechnung wird gemäß der Halterung im Versuch angesetzt. Die Oberseite der Glasscheibe wird bei Zugbelastung von innen an die Hülse gedrückt. Dadurch werden ausschließlich Druck-

kräfte übertragen. Eine Übertragung von Zugkräften wird ausgeschlossen. An der oberen Fläche des Zylinders wird eine gleichmäßig verteilte Zugkraft aufgebracht. In einer zusätzlichen Betrachtung wurde eine exzentrische Belastung aufgebracht und die Auswirkung auf die Spannungsverteilung in der Klebschicht betrachtet. Die Klebschicht mit einer Dicke von $d_K = 0,5 \text{ mm}$ wird mit zehn Elementen über die Höhe modelliert.¹⁴⁸

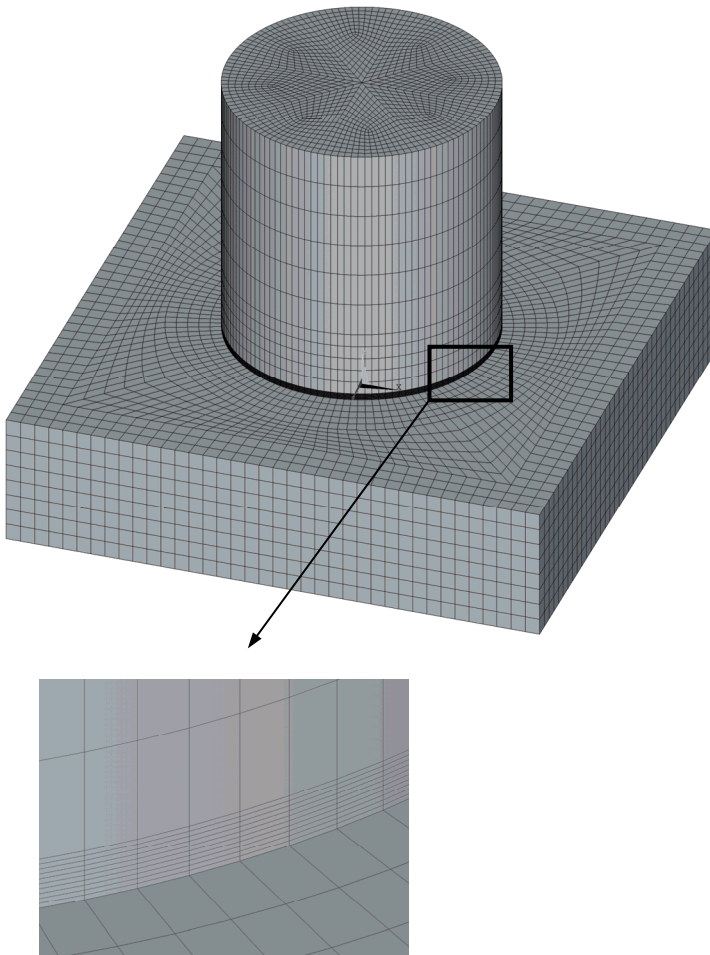


Bild 113 Dreidimensionales Modell des Zylinderzugprüfkörpers für die FE-Berechnung mit dem Programm ANSYS® 11.0. Die Klebschicht wurde mit 10 Elementen über die Dicke aufgebaut.

¹⁴⁸ Alternativ zu diesem Modell wurden die Fügeteile Glas und Metall im Bereich der Klebschicht in Höhe und Breite verfeinert modelliert. Die Ergebnisse zeigten ein in der zweiten Kommastelle abweichenden Wert der maximalen Spannungen. Wegen der deutlich längeren Rechenzeit bei gleichzeitig nur geringfügig veränderten Ergebnissen wurde bei der weiteren Bearbeitung auf diese Verfeinerung verzichtet.

Die FE-Berechnung wurde für beide Acrylatklebstoffe bis zu den ermittelten zulässigen Zugspannungen durchgeführt und mit den Daten der Zylinderzugprüfungen verglichen.¹⁴⁹ Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse in der Spannungs-Dehnungs-Beziehung mit den Messwerten. Im Anfangsbereich sind Abweichungen festzustellen, die auf Ungenauigkeiten der Prüfmaschine zurückzuführen sind. Wie auch schon im vorherigen Kapitel beschrieben, sollten die Versuche mit einer genaueren Verformungsmessung, zum Beispiel mit einem Videoextensometer, wiederholt werden, um besonders den empfindlichen Anfangsbereich besser zu erfassen.

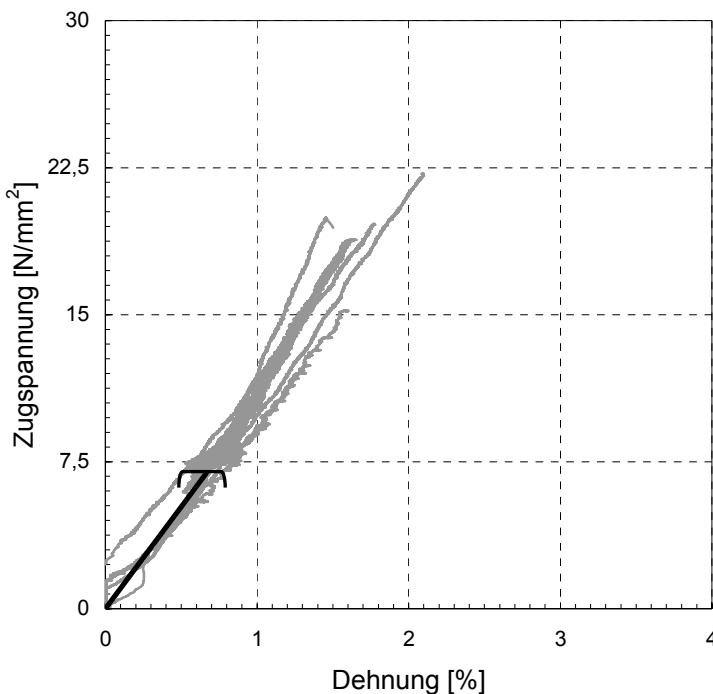


Bild 114 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung der Zylinderzugprüfkörper mit Photobond 4468 bei Raumtemperatur. Die grauen Kurven sind die Versuchsergebnisse, die schwarze Kurve stellt die Lösung der FE-Berechnung dar. Abgesehen von den Anfangsunregelmäßigkeiten zeigt sich eine gute Übereinstimmung bis zur zulässigen Spannung von 6,9 N/mm².

Die Messwerte für die Prüfkörper, die mit dem Photobond GB485 hergestellt wurden, sind bedingt durch die Streuungen der Dehnungen nicht exakt mit den Werten der FE-Berechnung übereinstimmend. Dennoch weisen sie eine gute Übereinstimmung mit den Steigungen typischer Kurvenverläufe.

¹⁴⁹ Die zulässigen Spannungen wurden anhand der Ergebnisse der Zylinderzugversuche ermittelt. Vergleiche hierzu Kapitel 9.5.

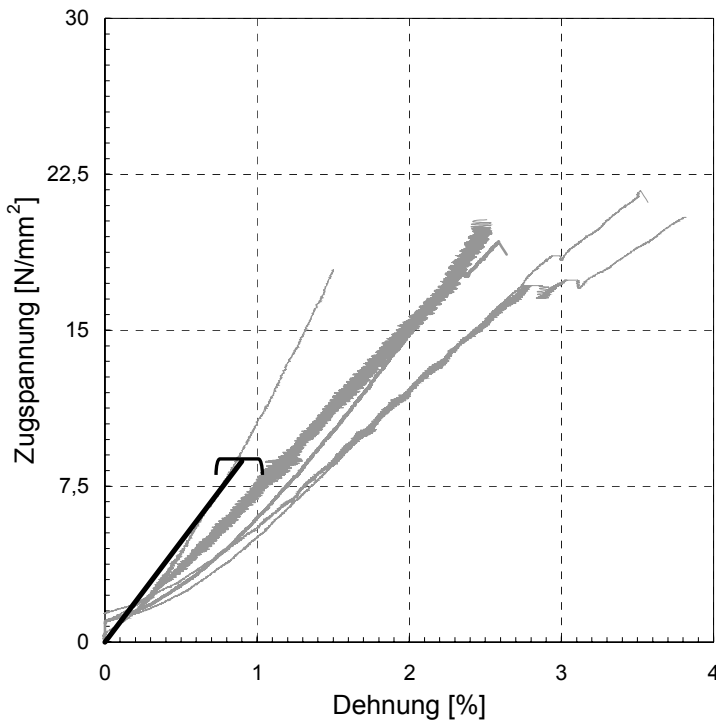


Bild 115 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung der Zylinderzugprüfkörper mit Photobond GB485 bei Raumtemperatur. Die grauen Kurven stellen die Ergebnisse aus den Versuchen dar, hier waren Schwierigkeiten bei der Verformungsmessung im Anfangsbereich vorhanden. Die schwarze Kurve zeigt die Lösung der FE-Rechnung bis zu der zulässigen Spannung von 8,7 N/mm².

Das Verformungsbild in der Klebschicht ist durch das Verhalten der Konstruktion unter Belastung geprägt. Die Glasplatte, die im äußeren Bereich flächig an die Hülse gedrückt wird und dort nur Druckkräfte übertragen kann, wölbt sich durch die mittig angreifende Zugbelastung nach oben. Gleichzeitig erfährt der Metallzylinder eine gleichmäßige Verschiebung in Kraftrichtung. Dadurch wird die Klebschicht entlang ihrer Fläche am Metallzylinder gleichmäßig nach oben gezogen. Durch die Fügeile, die sich unterschiedlich verformen, entsteht in der Klebschicht ein ungleichmäßiger Verformungszustand. Mittig, bei der größten Wölbung des Glases, wird der Klebstoff geringer gedehnt als in den Randbereichen. Dort kommt es zu einer vergrößerten Aufweitung der Klebung. Für die folgenden FE-Berechnungen werden die Zylinderzugprüfkörper mit dem Photobond 4468 betrachtet. Die aus den Versuchsergebnissen ermittelte zulässige Spannung von 6,9 N/mm² wird als gleichmäßige Zugbelastung auf die Oberkante des Zylinders angesetzt.

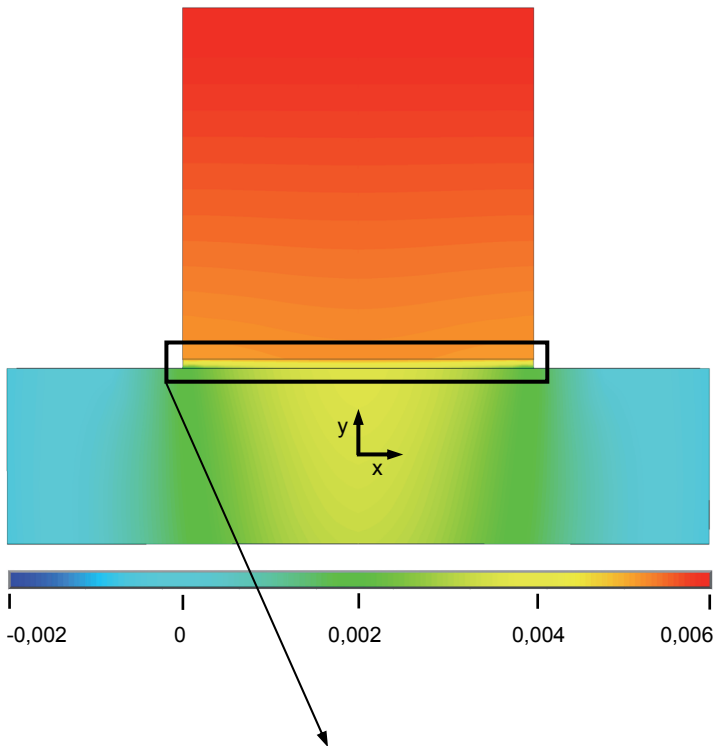


Bild 116 Schnitt durch den Zylinderzugprüfkörper mit farblicher Darstellung der Verformung in y -Richtung. Auf der oberen Fläche des Zylinders wurde eine Zugbelastung von $6,9 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Die vertikale Lagerung befindet sich auf der Oberseite der Glasplatte, hier können lediglich Druckkräfte übertragen werden.

Die Legende kennzeichnet die farbliche Zuordnung der Verformungswerte. Jede Darstellung wird mit einer individuellen Legende begleitet.

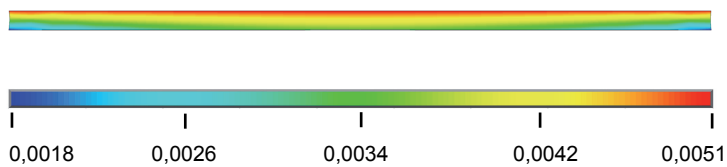
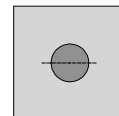
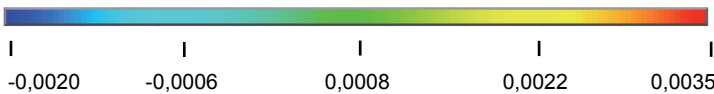
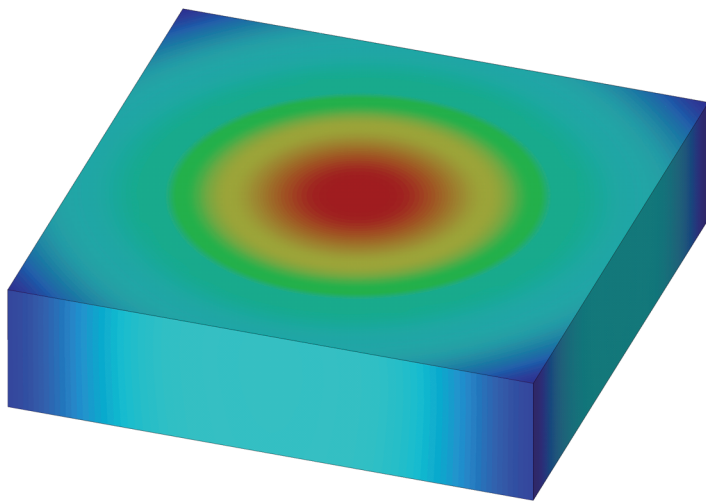


Bild 117 Verformung der Klebschicht in y -Richtung, dargestellt in 5-facher Überhöhung.

Verformung in [mm]





Verformung in [mm]

Bild 118 Verformung der Glasplatte. Im mittleren Bereich wölbt sie sich nach oben. Hervorgerufen durch die Lagerung, die eine Übertragung von Zugkräften ausschließt, erfahren die Eckbereiche eine negative Verformung.

Das Spannungsbild in der Klebschicht resultiert aus dem Verformungsverhalten dieser Prüfkörperkonstruktion. Durch die Wölbung der Glasplatte nach oben wird die Klebschicht mittig geringer als am Rand gedehnt. Die maximalen Spannungen treten - abgesehen von den lokalen Spannungsspitzen an den Rändern - bei etwa 85 % des Radius auf. Resultierend aus der Verformung der Glasplatte, fallen die Spannungen zur Mitte hin auf einen deutlich niedrigeren Wert ab.¹⁵⁰ Zum Rand hin nehmen die Spannungen durch den Einfluss der unbehinderten Querdehnung ab.

Nachfolgend werden die Spannungen in der Klebschicht aus dem Photobond 4468 dargestellt. Der Prüfkörper wird mit einer Belastung von $6,9 \text{ N/mm}^2$ gezogen.

¹⁵⁰ Vergleicht man hierzu eine Konstruktion, bei der die Glasplatte eine gleichmäßige Verformung erfährt, ergibt sich ein abweichendes Spannungsbild. Bis auf den Randbereich entsteht eine gleichförmige Spannungsverteilung mit den Maximalwerten im ausgeprägten mittleren Bereich. Vergleiche hierzu Schadow 2006, Seite 69 ff.

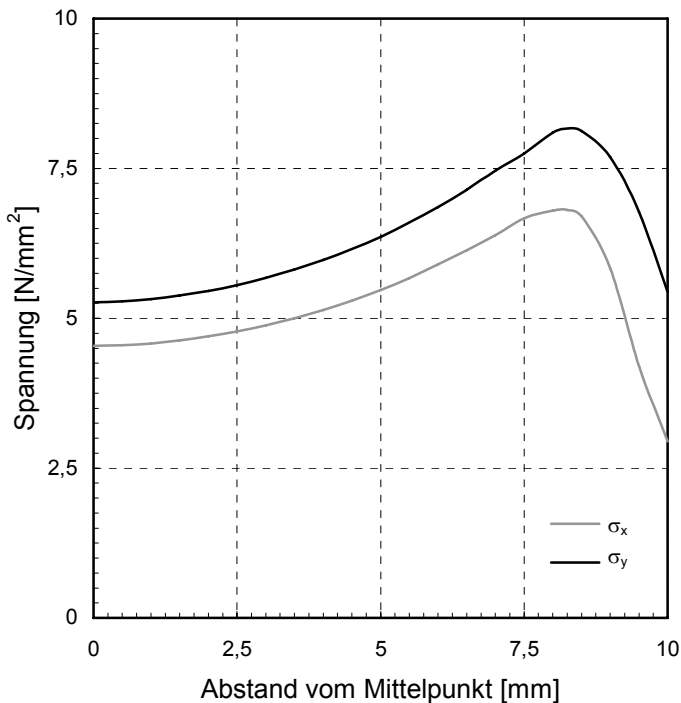
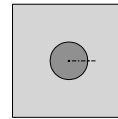


Bild 119 Spannungen σ_x und σ_y mittig im Schnitt durch die Klebfuge. Auf eine Darstellung der Spannungen in z-Richtung kann verzichtet werden, da sie bis auf den Randbereich die gleichen Spannungswerte wie in x-Richtung aufweisen.



Die Spannungen am Rand werden durch die gewählte Elemententeilung ungünstig wiedergegeben. In einer weiteren vergleichenden Berechnung an einem ebenen, rotations-symmetrischen Modell werden die Elemente verfeinert, um die Spannungen besser darzustellen. In dieser Arbeit wird jedoch das Hauptaugenmerk weniger auf das Spannungsbild im Randbereich gelegt, als vielmehr auf die Spannungsverteilung über die Fläche. Zumal die Übertragung der Kräfte im ungestörten Mittelteil erfolgt und die Berechnung sich nicht auf das Versagen beziehen soll.

Die Spannungsverteilung in einem Schnitt, der um 45° gedreht und auf die Ecke der Glasprobe zuläuft, ergibt Unterschiede, die geringer als 1 % sind. Zugunsten einer einfacheren Modellbildung kann deshalb bei zukünftigen Berechnungen von der quadratischen Form der Glasplatte abgewichen und auf eine runde übergegangen werden.

10.1.2 Rotationssymmetrische Modellierung

Zum Vergleich wird dem räumlichen ein rotationssymmetrisches Modell gegenübergestellt. Mit ihm können die Spannungen an den Rändern detailliert abgebildet werden. Die Achse des Metallzylinders bildet die Rotationsachse. Das System besteht aus ebenen Elementen vom Typ Plane 42, die um die Achse rotieren. Die Klebschicht wird mit einer verfeinerten Elemententeilung modelliert, um die Spannungen im Rand- und Eckbereich genauer zu betrachten. Ohne die Ergebnisse zu beeinflussen, wird der Metallzylinder verkürzt abgebildet. Die Randbedingungen und Belastungen werden vergleichbar zum dreidimensionalen Modell gewählt. Die Lagerung erfolgt entsprechend der Versuchsdurchführung auf der Oberseite der Glasplatte. Die Zuglast greift mittig an der Oberseite des Zylinders an.

Aufgrund der verfeinerten Elemententeilung werden die Spannungen besonders im Randbereich der Klebfuge genauer abgebildet. Mittig am freien Rand befindet sich ein Bereich, der sich ohne Querdehnungsbehinderung verformen kann. Hier fallen die Spannungen auf einen niedrigen Wert ab. Hohe Spannungsspitzen treten auf Grund der Verformungsbehinderung und den damit entstehenden Zwängungen am Übergang des Klebstoffrandes zu den Fügeteilen Glas und Metall auf.

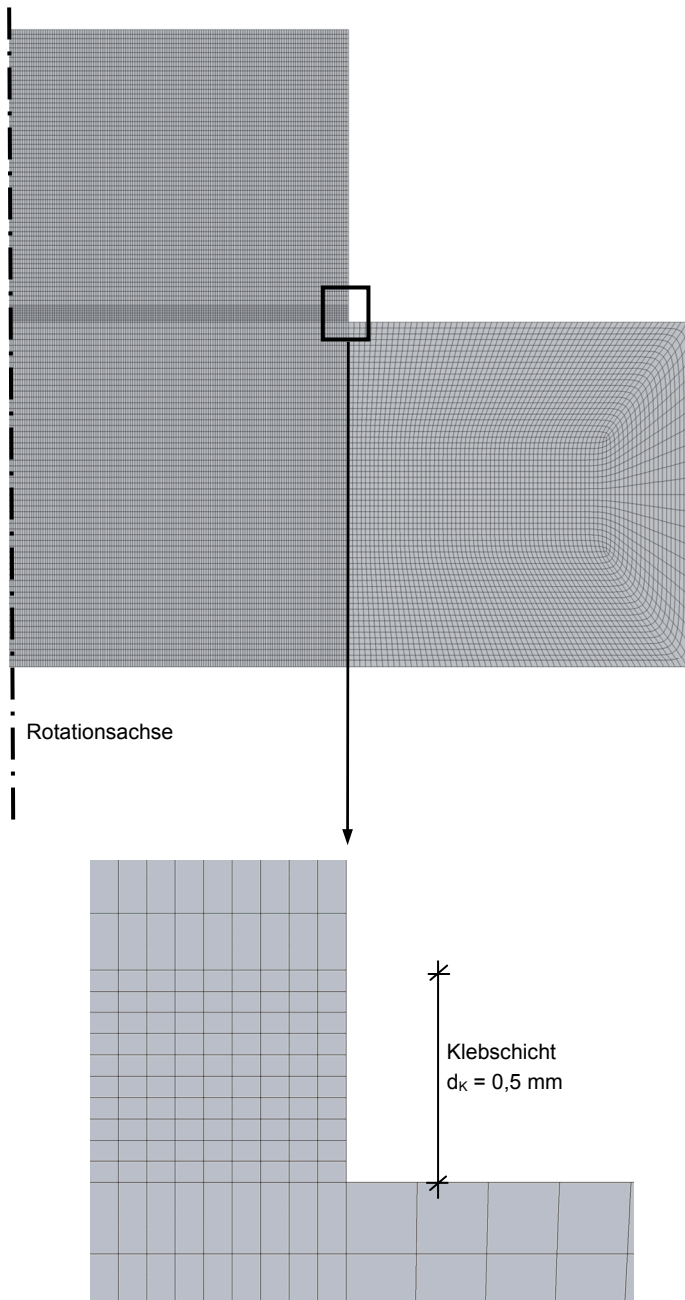


Bild 120 Rotationssymmetrisches System im Ganzen (oben) und Aufbau der Klebschicht im Detail (unten). Die Rotationsachse entspricht der Achse des Prüfkörpers. Die Klebschicht wird mit 10 Elementen über die Dicke aufgebaut.

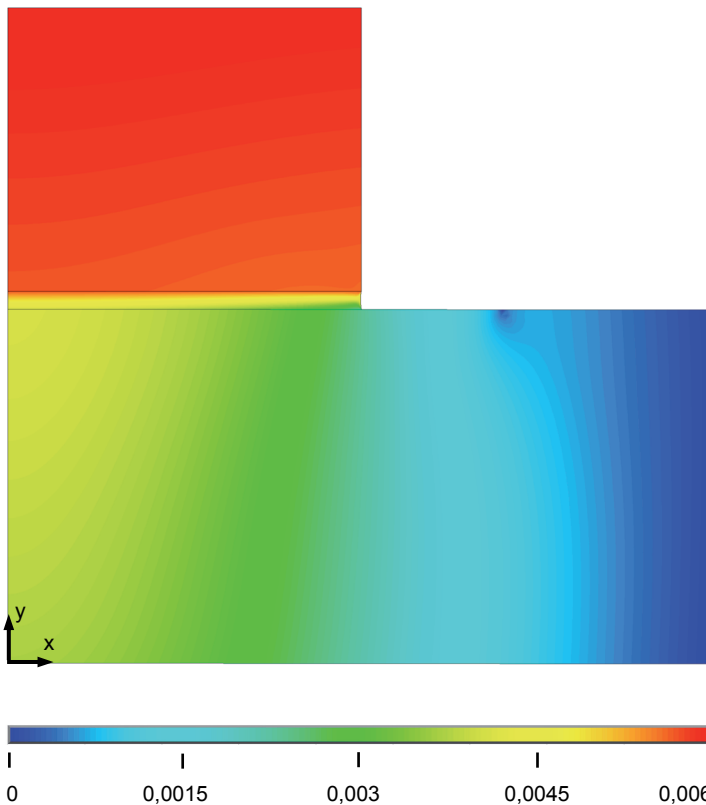


Bild 121 Verformung in y-Richtung, also in Krafrichtung. Eine gleichmäßige Flächenlast in Höhe der zulässigen Spannung mit $6,9 \text{ N/mm}^2$ wird auf die Oberseite des Zylinders aufgebracht. Die vertikale Lagerung befindet sich an der Glasoberseite.

Die rotationssymmetrische Betrachtung erlaubt eine verfeinerte Einteilung mit kleineren Elementen. Dadurch werden die Spannungen genauer abgebildet. Besonders deutlich werden die Unterschiede am Randbereich. Da hier eine deutliche Änderung der Spannungswerte stattfindet, konnten sie durch die Modellierung im dreidimensionalen Modell nur ungenügend abgebildet werden. Die Gegenüberstellung der Spannungen beider Berechnungen, jeweils auf der Mittellinie der Klebschicht dargestellt, zeigen eine gute Übereinstimmung in einem Bereich in einem ausgeprägten mittleren Bereich. Die Spannungsmaxima unterscheiden sich um etwa 1 %. In der Lage zeigen sich geringfügige Abweichungen. Im Randbereich allerdings weichen die Spannungswerte deutlich voneinander ab. Die dreidimensionale Modellierung kann den Spannungsabfall nur ungenügend abbilden. Ist eine Ermittlung der genauen Werte an dieser Stelle erforderlich, zum Beispiel für eine Betrachtung des Versagens, so ist das verfeinerte Modell anzuwenden. Es werden hier

sowohl die Spannungen in der Mitte des Klebstoffrandes wie auch die Spannungsspitzen am Übergang zum Füge­teil besser abgebildet. Bleibt die Berechnung im linearen Anfangsbereich bis zu den zulässigen Spannungen, kann auf eine verfeinerte Elemententeilung verzichtet werden.

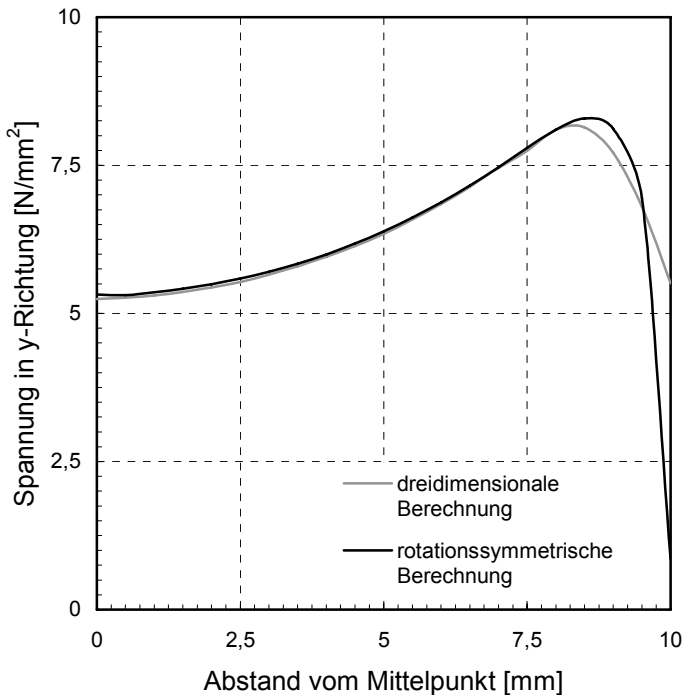
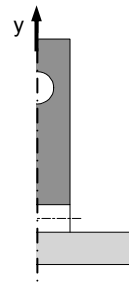


Bild 122 Gegenüberstellung der Spannungsverläufe (in y-Richtung) entlang der Mittellinie der Klebschicht für die dreidimensionale und die rotationssymmetrische Modellierung. Die Spannungen am Rand der Klebfuge werden bei der rotationssymmetrischen Berechnung genauer abgebildet.

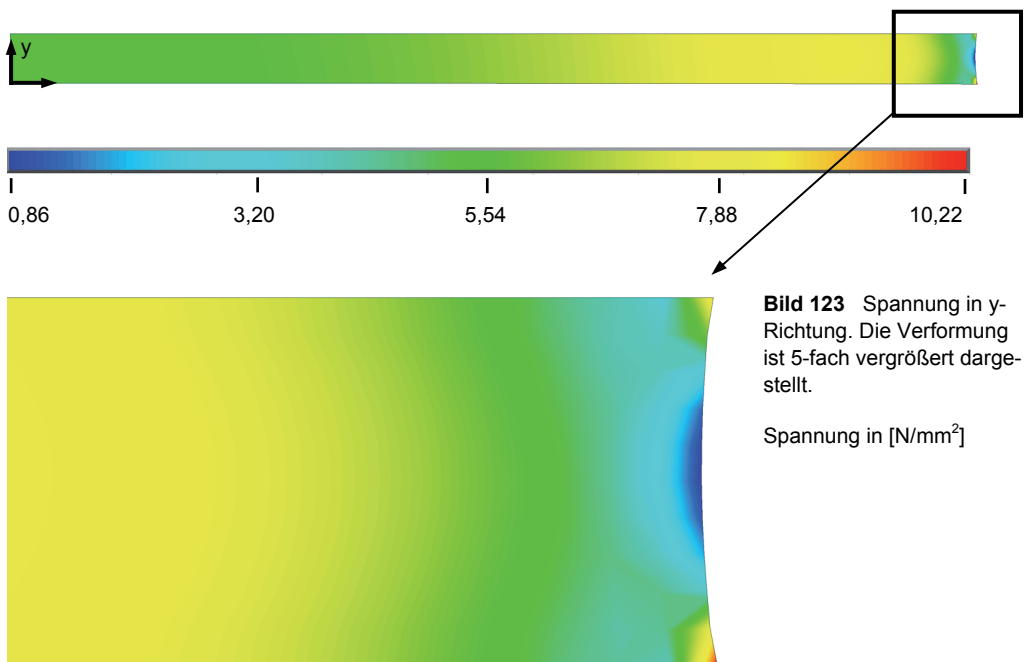


Auf die Spannungsverteilung am Rand wird nachfolgend genauer eingegangen. Die Darstellung zeigt die Spannungen in die verschiedenen Richtungen.

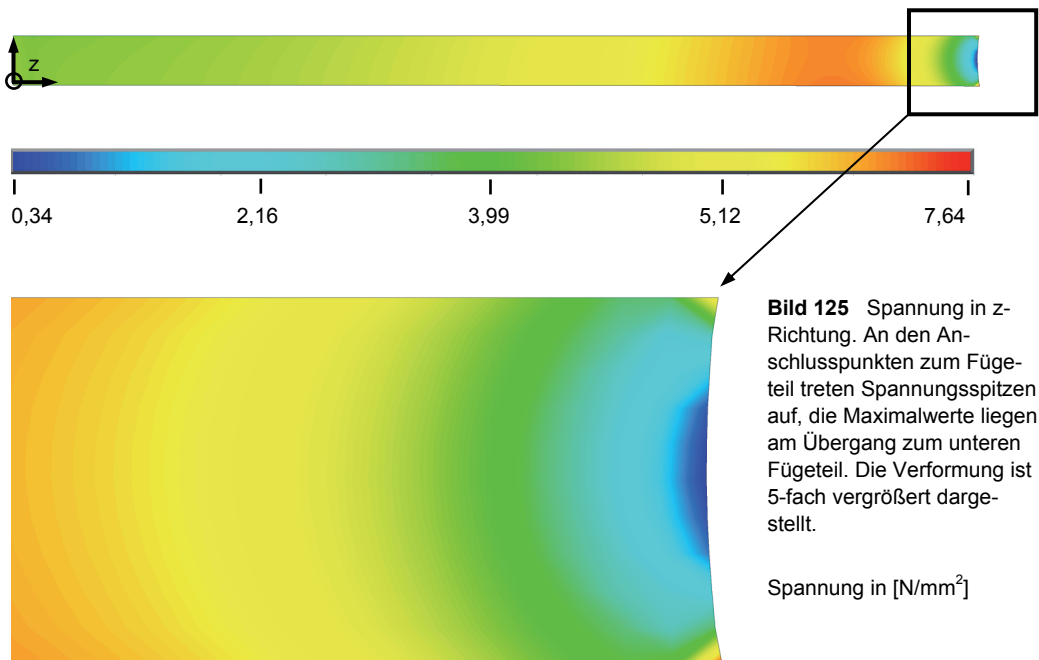
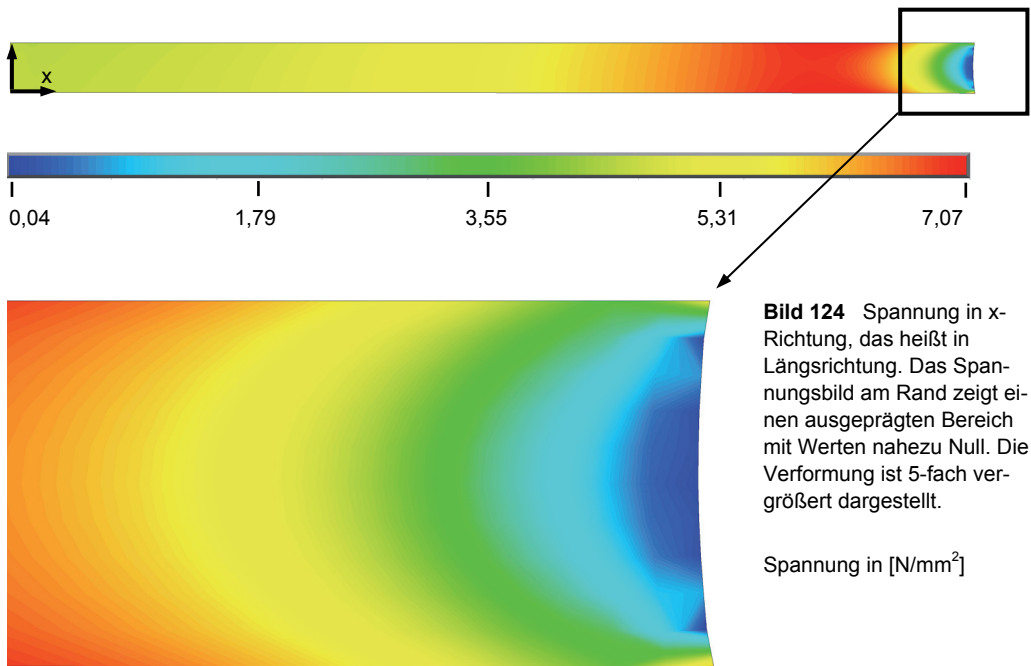
Hohe lokale Spannungsspitzen treten auf Grund der Verformungsbehinderung und den damit entstehenden Zwängungen am Übergang zum Füge­teil auf. Bedingt durch die Geometrie entstehen am unteren Übergang, also am Füge­teil Glas, die höchsten Spannungen. Eine fehlerfreie Ausführung der Klebung vorausgesetzt, werden die lokalen Spannungsmaxima ausschlaggebend für das Versagen sein. Betrachtet man die Bruchbilder der Prüfkörper, tritt häufig ein Adhäsionsverlust auf der metallseitigen Oberfläche auf. An dieser Stelle herrschen jedoch geringere Spannungswerte als am Füge­teil Glas. Ebenso häufig tritt ein wechselseitiges Adhäsionsversagen auf. Der Bruchsprung konnte bei den

Versuchen nicht festgestellt werden. Um ein Versagenskriterium aufzustellen, sind vertiefende Versuche zu Adhäsionskräften, aber auch zu der Grenzschicht mit ihren gradierten Eigenschaften notwendig.

Bei einer gleichmäßigen Zugbelastung von $6,9 \text{ N/mm}^2$ treten in der Klebfuge Spannungen in y-Richtung zwischen $0,86 \text{ N/mm}^2$ und $10,22 \text{ N/mm}^2$ auf. Im mittleren Bereich betragen die Spannungen etwa $5,5 \text{ N/mm}^2$. Dieser Aspekt verdeutlicht die Problematik einer Berechnung geklebter Verbindungen. Zum jetzigen Zeitpunkt sind weiterhin Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit einer Verbindung erforderlich.¹⁵¹



¹⁵¹ Im Automobilbau werden Klebungen im großen Umfang eingesetzt. Jedoch werden für tragende Verbindungen Hybridfügeverfahren verwendet. Hierbei werden Klebungen mit konventionellen punktförmigen Füge-techniken kombiniert, beispielsweise Punktschweiß-, Stanzniet- oder Clinchkleben. Der alleinige Einsatz von Klebungen in tragenden Verbindungen in diesem Bereich ist aufgrund fehlender Berechnungsverfahren nur bedingt möglich. Vergleiche hierzu Dilger 2005, Seite 359 f. und Handing 2006, Seite 4.



10.1.3 Variantenuntersuchung

Zusätzlich werden die Berechnungen von einer Parameterstudie begleitet. Die Klebstofffuge wird mit verschiedenen Schichtdicken betrachtet. Weiterhin wird der Zylinder im Durchmesser modifiziert. Durch den Aufbau des Prüfkörpers ist dies mit einer Variation der Klebfläche gleichzusetzen.

Variable		Grundsystem	Variationen
Durchmesser Ø	[mm]	20	14 / 16 / 18 / 22
Fugendicke d_K	[mm]	0,5	0,2 / 1,0

Tafel 15 Parameter für die Variantenuntersuchung des Zylinderzugprüfkörpers.

Die Durchmesser der Metallzylinder und somit der Klebfläche werden dabei schrittweise von 14 mm auf 22 mm erhöht.¹⁵² Für diese Untersuchung bleiben die Klebfugendicke und die weiteren Abmessungen der Fügeteile vorerst unverändert. Die resultierende Belastung des Systems bleibt konstant. Die Flächenlast von $6,9 \text{ N/mm}^2$ bei einem Durchmesser von 20 mm - aus den vorangegangenen Untersuchungen - wird auf die jeweilige Fläche umgerechnet. Bei dieser Studie werden die Spannungen entlang der Mittellinie der Klebschicht betrachtet.

Hierbei ist ein deutlicher Anstieg der Spannungen bei geringer werdendem Durchmesser erkennbar. Die Kräfte verteilen sich auf eine kleinere Fläche. Die Maximalwerte der auftretenden Spannungen stehen in einem offensichtlichen Verhältnis zur geklebten Fläche. Vom Rand aus gesehen liegen die Maximalwerte etwa an der gleichen Stelle. Zum freien Rand hin fallen die Spannungen deutlich ab.

Je größer der Durchmesser der Klebfläche, umso ausgeprägter ist der Einfluss der Glasplatte mit ihrer Wölbung nach oben. Durch diese Verformung entstehen eine Entlastung in der Klebfuge und dadurch ein Spannungsabfall zur Rotationsachse hin. Bei kleinerem Durchmesser fällt diese Spannungsabminderung geringer aus. Je größer der Durchmesser, umso größer ist das Verhältnis von der maximalen Spannung zur Spannung an der Rotationsachse bei

¹⁵² Die Wahl der Durchmesser orientiert sich an vorangegangene Untersuchungen, vergleiche hierzu Prautzsch 2005.

$r = 0$ mm. Dieses Verhältnis steht in einer nahezu linearen Beziehung zu der Größe der Klebfläche.

Die Klebfuge erfährt über ihre Fläche eine ungleichmäßige Dehnung. Durch die Wölbung der Glasscheibe ist die Dehnung in Scheibenmitte geringer als in den Randbereichen. Deshalb wird für diese Betrachtung die Dehnung der Klebfuge aus ihrer Verformung am Rand im Verhältnis zu ihrer ursprünglichen Dicke ermittelt. Die Abhängigkeit von der geklebten Fläche wird deutlich. Bei größer werdender Fläche verringert sich die Dehnung. Je kleiner die lastverteilende Fläche, umso größer sind die auftretenden Dehnungen. Die geringen Werte der Dehnungen, die zwischen 0,5 % und 1,2 % liegen, verdeutlichen nochmals das Erfordernis einer genauen Verformungsmessung.

Die gewählte Konstruktion mit 20 mm Durchmesser - beziehungsweise einem Radius von 10 mm - erweist sich als geeignet. Obwohl die Spannungen im Verhältnis stärker abfallen als bei schmalen Zylindern, sind die maximalen Spannungen bei gleicher Belastung deutlich geringer.

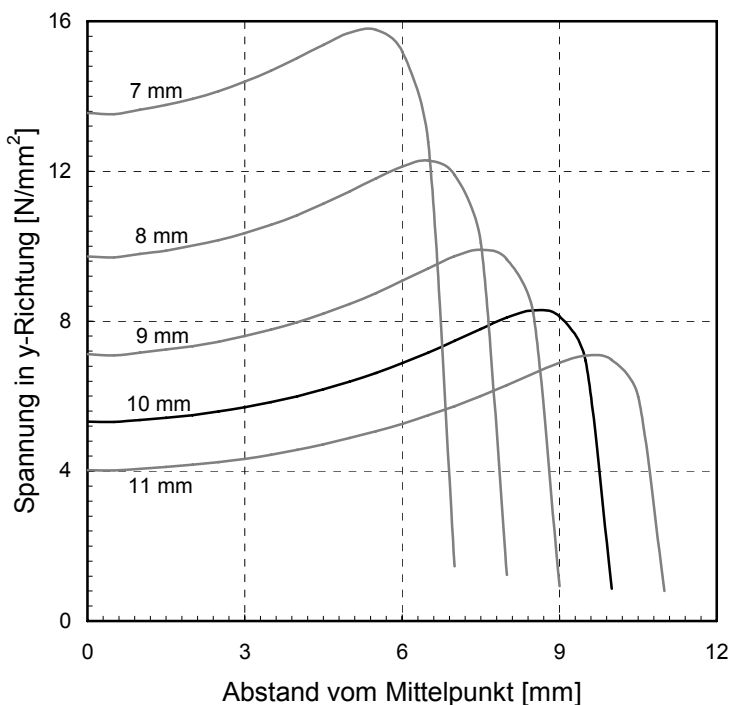
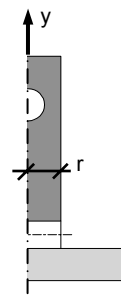


Bild 126 Verlauf der Spannung in y-Richtung mittig in der Klebschicht, Radius 7/8/9/10/11 mm. Das Grundsystem mit einem Radius von 10 mm ist in schwarz dargestellt.



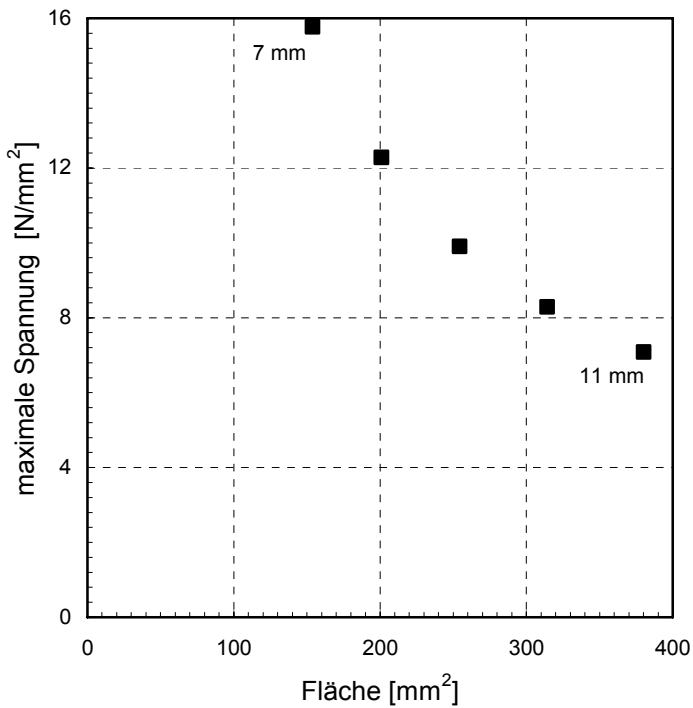


Bild 127 Maximale Spannung σ_{\max} in y-Richtung mit-
tig in der Klebschicht in Ab-
hängigkeit zur geklebten
Fläche.
Radius 7/8/9/10/11 mm.

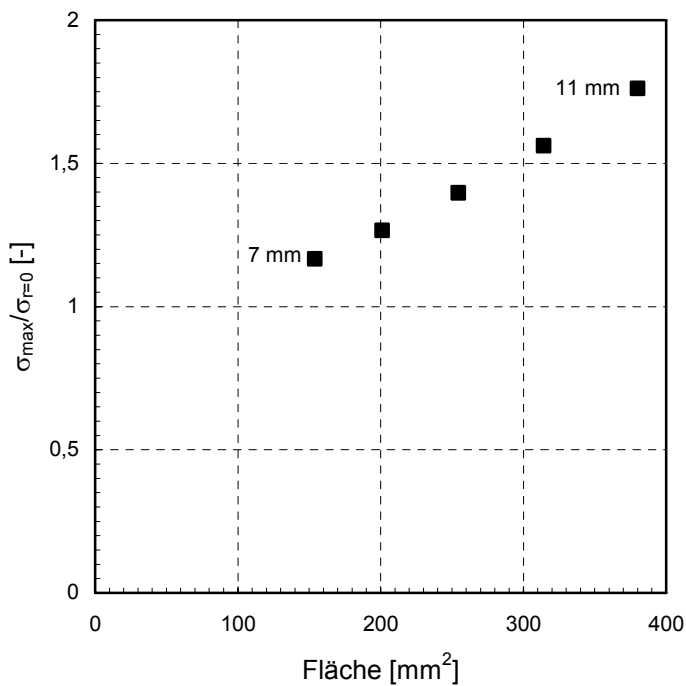
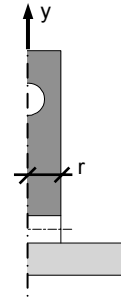
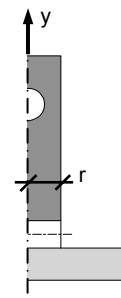


Bild 128 Verhältnis der
maximalen Spannung in
y-Richtung zur Spannung
bei $r = 0$ mm in Abhängigkeit
zur geklebten Fläche.
Radius 7/8/9/10/11 mm.



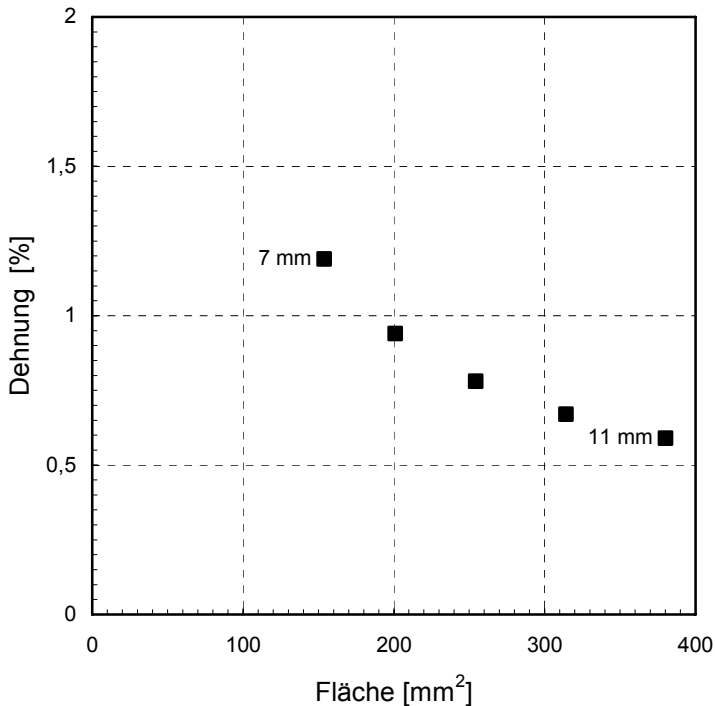
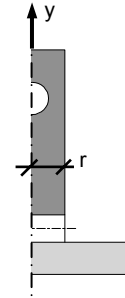


Bild 129 Dehnung der Klebfuge in Abhängigkeit zur Fläche. Die Dehnung wird aus der Verformung am Rand bezogen auf die ursprüngliche Dicke ermittelt. Radius 7/8/9/10/11 mm.



Die Klebfuge wird mit variierenden Dicken betrachtet. Zusätzlich zur standardmäßigen Dicke von 0,5 mm werden Klebfugen mit 0,2 mm und 1,0 mm untersucht. Die Berechnungen basieren auf gleichbleibenden Materialkennwerten für die Klebfugen.¹⁵³ Um die prinzipiellen Auswirkungen aus der reinen Änderung der Klebfugendicke zu erfahren, wurden alle Berechnungen mit den für Klebfugen von 0,5 mm Dicke ermittelten Materialkennwerten durchgeführt.

Der Einfluss der Schichtdicke ist bei der Spannungsverteilung entlang der Mittellinie der Klebstoffuge deutlich erkennbar. Je dünner die Fuge, umso ausgeprägter und spitz zulaufender ist das Spannungsmaximum. Gleichzeitig fallen die Spannungen zur Mitte der Klebfuge umso stärker ab. Die Fuge mit 1,0 mm Dicke weist über die gesamte Breite - den

¹⁵³ Wie im Kapitel 6 erläutert, besitzt der Klebstoff gradierte Eigenschaften. In der Grenzschicht, ein schmaler Bereich nahe dem Fügeteil, verhält sich der Klebstoff steifer. In der Mitte liegt Bulkmaterial vor. Die Materialkennwerte - gemittelt über die Klebschichtdicke - werden durch dieses Verhalten beeinflusst. Die hier angesetzten Werte basieren auf Untersuchungen an der Rohrprobe mit einer Klebfugendicke von 0,5 mm.

freien Rand vernachlässigt - einen nahezu gleichförmigen Verlauf auf.

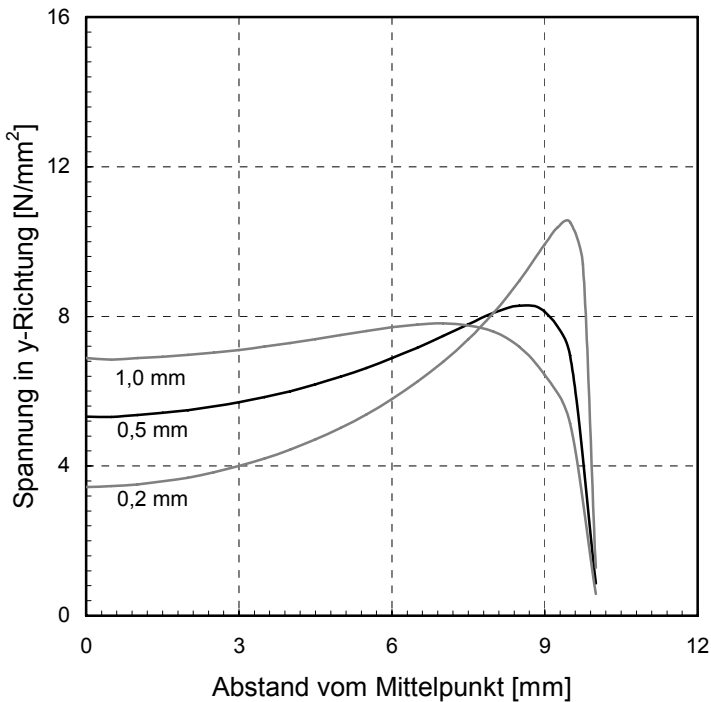
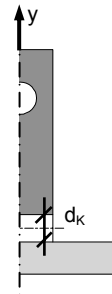


Bild 130 Verlauf der Spannung in y-Richtung mittig in der Klebschicht für Klebschichtdicken von 0,2/0,5/1,0 mm. Die Ergebniskurve für den Ausgangsquerschnitt mit 0,5 mm ist in schwarz dargestellt.



Betrachtet man das Verhältnis von der maximalen Spannung zur Spannung an der Rotationsachse bei $r = 0$ mm, so ist ein deutlicher Anstieg bei Dicken mit 0,2 mm zu verzeichnen. Mit dicker werdender Klebschicht nähert sich dieses Verhältnis dem Wert 1. Spannungsspitzen treten hierbei in deutlich abgemilderter Ausprägung auf.

Aufgrund dieser Ergebnisse erweist es sich als günstig, für Konstruktionen, die Zugkräfte übertragen, Klebschichtdicken von 0,5 mm oder größer einzusetzen. Dünnere Klebfugen rufen einen Spannungsverlauf hervor, der geprägt ist von deutlichen Schwankungen in den Spannungswerten. Vorteilhaft erweist sich ein gleichförmiger Spannungsverlauf über die Klebfläche, der bei dickeren Klebfugen erreicht wird.

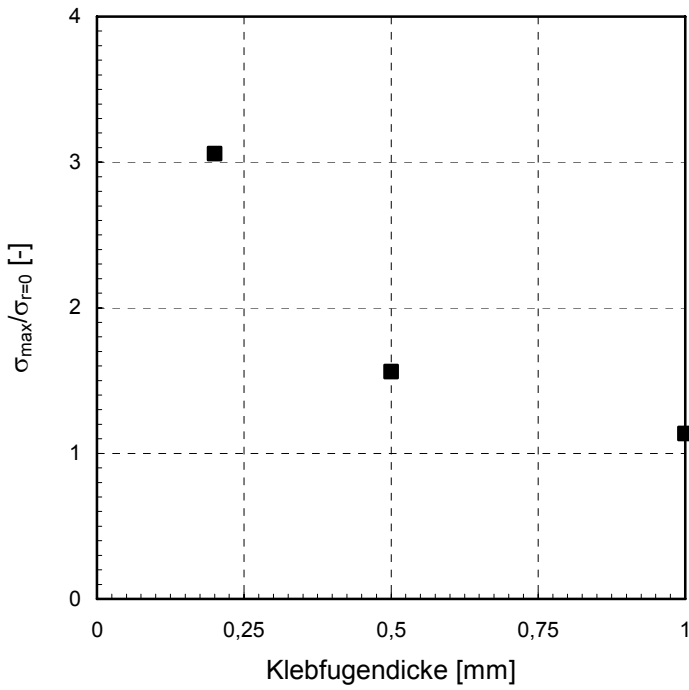
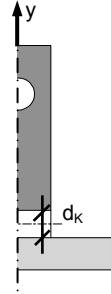


Bild 131 Verhältnis der maximalen Spannung in y-Richtung zur Spannung bei $r = 0$ mm in Abhängigkeit zu den Klebschichtdicken von 0,2/0,5/1,0 mm.



10.2 Druckscherversuch

10.2.1 Modellierung

Die Druckscherprüfkörper, die für die Versuche verwendet wurden, werden mit einem dreidimensionalen Modell abgebildet.¹⁵⁴ Für beide Klebstoffe, Photobond 4468 und Photobond GB485 werden die Versuchsergebnisse den berechneten Werten gegenübergestellt.

Die Lagerung und Belastung wird der Versuchsdurchführung nachempfunden.¹⁵⁵ Das Fügeitell aus Glas ist stirnseitig unverschieblich gelagert. Auf die gegenüberliegende Seite des Fügeitells aus Edelstahl wirkt eine Druckbelastung.

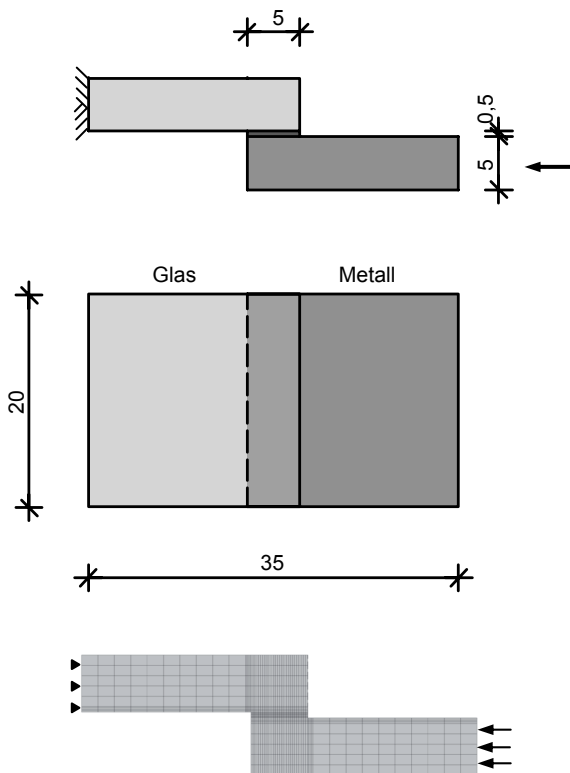


Bild 132 Druckscherprüfkörper. Oben ist der Prüfkörper mit den Maßen, unten die Modellierung mit den Lasten und Randbedingungen zu sehen.

Maße in [mm]

¹⁵⁴ Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wäre ein ebenes Modell durchaus ausreichend gewesen, aber aufgrund der Rechenkapazität war der benötigte Zeitaufwand für die Modellierung gering. Bei äußerst genauen Berechnungen ist eine dreidimensionale Modellierung notwendig, da sich die Spannungswerte quer zur Belastungsrichtung geringfügig ändern. Vergleiche hierzu Hahn 2007, Seite 62 f.

¹⁵⁵ Eine präzise Nachbildung erfordert weiterhin den Ansatz der Reibung und der Lagerung an den Außenflächen der Fügeiteile. Dabei ergibt sich jedoch nur eine geringfügige Änderung in den Spannungswerten, so dass bei der nachfolgenden Berechnung darauf verzichtet werden kann.

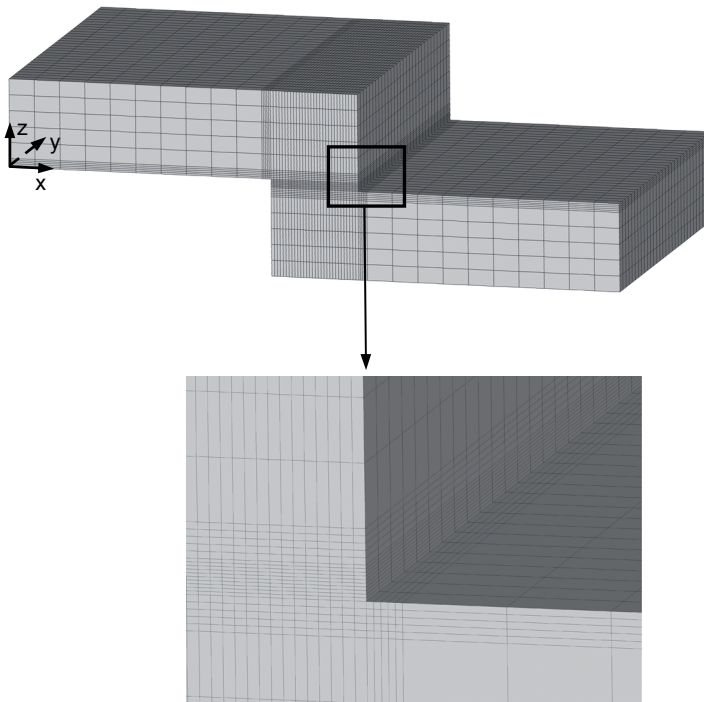


Bild 133 Modellierung des Druckscherprüfkörpers. Für die Klebschicht und die angrenzenden Bereiche wurde eine verfeinerte Elemententeilung gewählt.

Die Berechnung des Druckscherprüfkörpers erfolgt für beide Klebstoffe mit einem linearen Materialgesetz bis zu den zulässigen Spannungen.¹⁵⁶ Das Materialverhalten der geklebten Verbindung wird für den baupraktisch relevanten Bereich abgebildet. Die Kennwerte der Klebschicht für diese Modellierung wurden an der Rohrprobe ermittelt.

Wie bei den Zylinderzugprüfkörpern zeigt sich in dieser Berechnung für beide Klebstoffe eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse in der Schubspannungs-Gleitungs-Beziehung mit den Messwerten. Trotz der Unregelmäßigkeiten im Anfangsbereich durch die Verformungsmessung ist für beide Acrylate eine Gleichförmigkeit in der Steigung der Kurven festzustellen. Die nachfolgende Darstellung beschränkt sich auf die Druckscherprüfkörper, die mit dem Photobond 4468 geklebt wurde.

¹⁵⁶ Vergleiche hierzu Kapitel 9.5 dieser Arbeit.

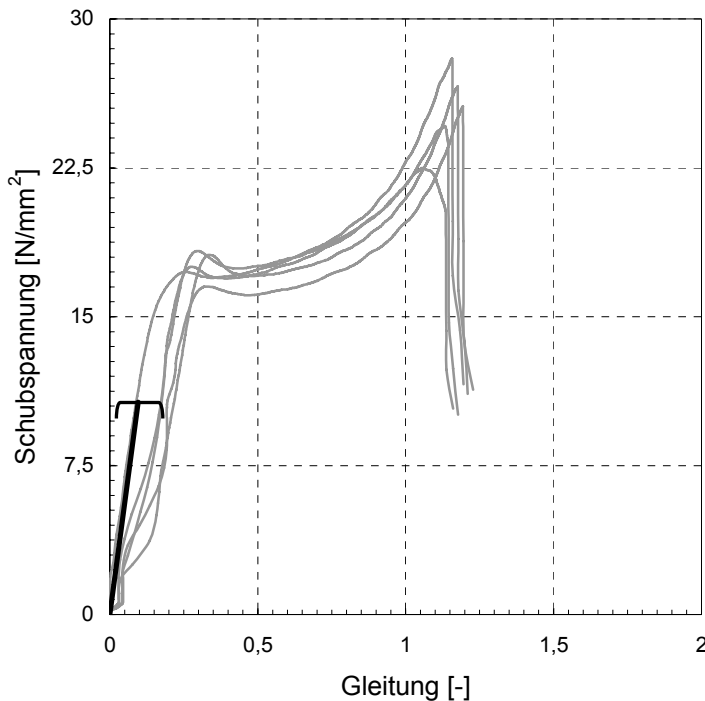


Bild 134 Schubspannung-Gleitungs-Beziehung des Druckscherprüfkörpers mit Photobond 4468 bei Raumtemperatur. Die grauen Kurven sind die Versuchsergebnisse, die schwarze Kurve stellt die Lösung der FE-Berechnung dar. Abgesehen von den Anfangsunregelmäßigkeiten zeigt sich eine gute Übereinstimmung bis zur zulässigen Spannung von $10,7 \text{ N/mm}^2$.

Das Verformungsbild zeigt deutlich die Verschiebung in der Klebfuge. Die Glasplatte wird gehalten, das Fügeteil aus Edelstahl erfährt stirnseitig eine Druckbelastung. Beide Fügeteile werden geringfügig gestaucht. Der größte Anteil der Gesamtverformung fällt auf den Klebstoff.

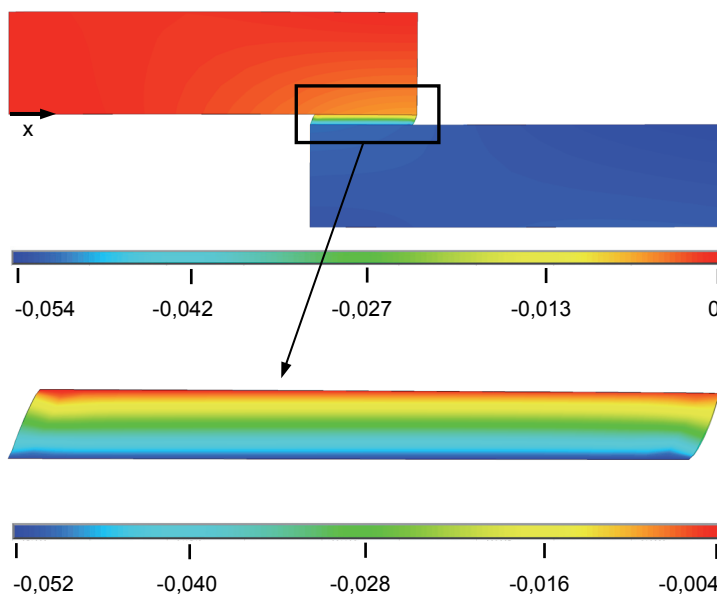


Bild 135 Verformung in x-Richtung an einem Schnitt mittig durch den Prüfkörper. Oben ist das Gesamtsystem bestehend aus Glas, Edelstahl und Klebschicht zu erkennen. Das Glas ist an der linken Stirnseite unverschieblich gelagert. Die Druckkraft wird von rechts auf das Metall aufgebracht. In der unteren Darstellung ist die verformte Klebfuge herausgelöst.

Verformung in [mm]

Für die folgenden FE-Berechnungen werden die Druck-scherprüfkörper mit dem Photobond 4468 betrachtet. Aus der zulässigen Spannung von $10,7 \text{ N/mm}^2$ wird eine Flächenlast berechnet, die stirnseitig als Druckbelastung angesetzt wird.

Herausgelöst aus dem Gesamtsystem wird die Klebfuge mit ihren Spannungen dargestellt. An einem Schnitt entlang der Mittelebene werden die Von-Mises-Vergleichsspannung, die Schubspannung in xz-Ebene und die Spannungen jeweils in x- und z-Richtung gezeigt.¹⁵⁷

Im mittleren Bereich der Klebfuge präsentiert sich ein gleichförmiger Spannungsverlauf. Die berechnete Schubspannung τ_{xz} von $10,9 \text{ N/mm}^2$ zeigt eine gute Übereinstimmung mit der zulässigen Schubspannung von $10,7 \text{ N/mm}^2$, die umgerechnet als Druckkraft auf das System angesetzt wurde.

Wie bei den Zugversuchen treten auch hier hohe Spannungsspitzen am Klebstoffrand auf, insbesondere am Übergang zum Füge teil. Diese entstehen durch die Verformungsbehinderung, die durch die steifen Füge teile erzeugt wird. Die Vergleichsspannung betrachtend treten Spannungsspitzen mit Werten bis $34,57 \text{ N/mm}^2$ am rechten unteren Übergang zum Metallfüge teil auf.¹⁵⁸ Von dieser Stelle nach oben bis zur Klebfugenmitte sinken die Spannungswerte auf Spannungen von $7,69 \text{ N/mm}^2$. Am Übergang zum Füge teil aus Glas treten niedrigere Spannungsspitzen auf. Glas hat niedrigere Steifigkeitswerte als Stahl und stellt somit eine geringere Dehnungsbehinderung dar.

¹⁵⁷ Auf die Darstellung der Spannungen in y-Richtung wird verzichtet, sie entsprechen in etwa den Spannungen in x-Richtung.

¹⁵⁸ Ist eine genaue Betrachtung der Spannungsspitzen erforderlich, beispielsweise um ein Versagenskriterium aufzustellen, so wird der Ansatz eines linear-elastischen Materialgesetzes keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern. In diesem Fall ist das Materialverhalten mit den plastischen Anteilen genau abzubilden. Für diese Studie ist die hier getroffene Vereinfachung jedoch ausreichend.

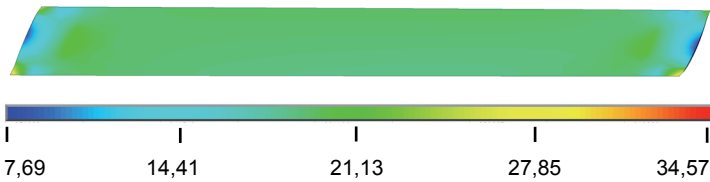


Bild 136 Von-Mises-Vergleichsspannung. Schnitt durch die Klebfuge entlang der Mittellinie.

Spannung in $[\text{N/mm}^2]$

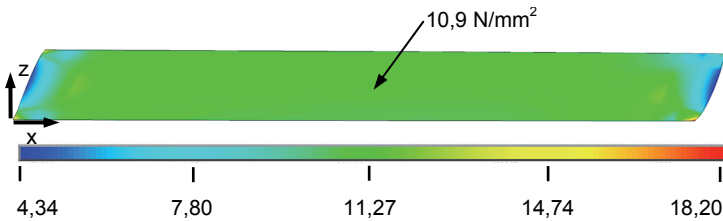


Bild 137 Schubspannung in xz-Ebene. Schnitt durch die Klebfuge entlang der Mittellinie.

Spannung in $[\text{N/mm}^2]$

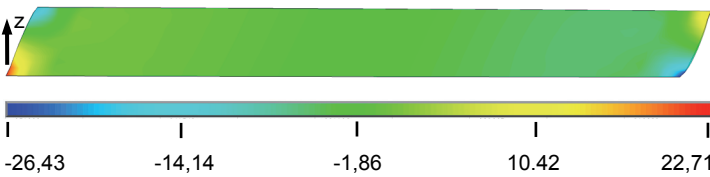


Bild 138 Spannung in z-Richtung. Schnitt durch die Klebfuge entlang der Mittellinie.

Spannung in $[\text{N/mm}^2]$

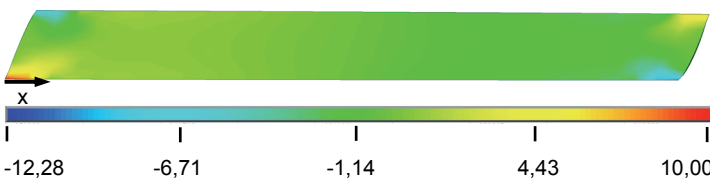


Bild 139 Spannung in x-Richtung. Schnitt durch die Klebfuge entlang der Mittellinie.

Spannung in $[\text{N/mm}^2]$

10.2.2 Variantenuntersuchung

Zusätzlich zu dem ausgeführten System der Druckscherprüfkörper mit den Grundabmessungen werden die Klebfugendicke und die Überlappungslänge verändert. Die Klebfuge wird mit Dicken von 0,2 mm und 1,0 mm betrachtet. Für die Überlappungslänge wird das ursprüngliche Maß verdoppelt beziehungsweise halbiert. Eine Überlappungslänge von 2,5 mm ist praktisch schwer ausführbar, dient aber zum Verdeutlichen des Einflusses.

Variable		Grundsystem	Variationen
Fugendicke d_K	[mm]	0,5	0,2 / 1,0
Überlappungslänge l_0	[mm]	5	10 / 2,5

Tafel 16 Parameter für die Variantenuntersuchung des Druckscherprüfkörpers.

Betrachtet man die Variation der Klebschichtdicke, fällt auf, dass die Unterschiede in den Spannungswerten geringer ausfallen als bei den Zylinderzugversuchen.

Die Spannungsmaxima der Vergleichsspannung und der Schubspannung in xz-Ebene steigen mit zunehmender Schichtdicke lediglich minimal an. Je dünner die Fuge, umso spitzer ist die Ausbildung des Spannungsmaximums und liegt näher am freien Rand. Die Werte der Spannungen in x- und z-Richtung nehmen, vom Betrag her gesehen, bei dünnen Fugendicken besonders an der rechten Seite zu.

Bei Variation der Überlappungslänge zeigen sich erwartungsgemäß deutliche Unterschiede in den Spannungswerten. Bei großer Überlappungslänge verteilen sich die Kräfte auf eine größere Fläche. Die Spannungen sind niedriger. Die Maximalwerte der Vergleichs- und Schubspannungen nehmen bei der doppelten Überlappungslänge etwa die Hälfte des Wertes an.

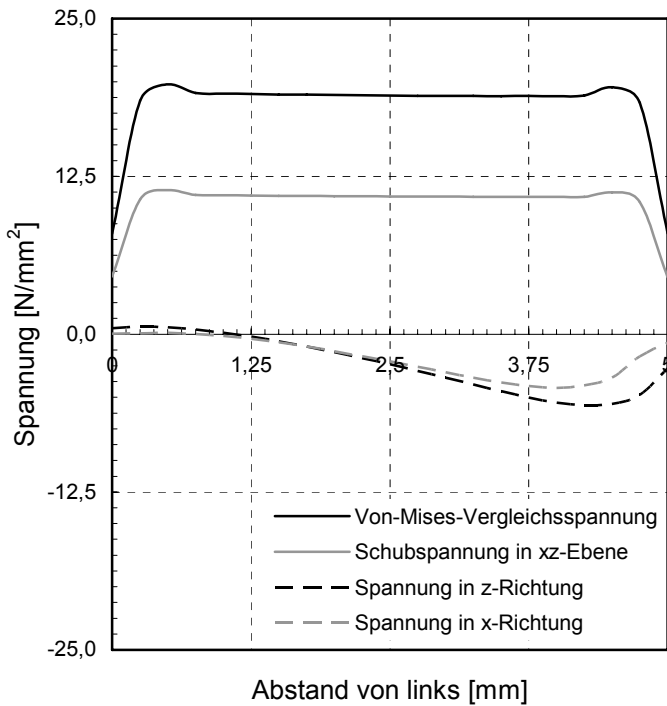


Bild 140 Spannungsverteilung an einem Pfad mittig in der Klebfuge. Grundsystem mit einer Fugendicke von 0,5 mm und einer Überlappungslänge von 5 mm.

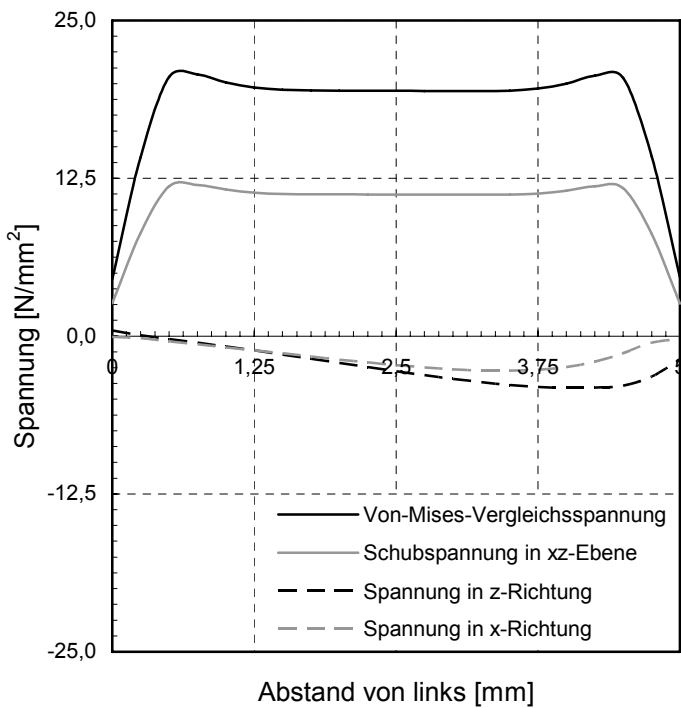
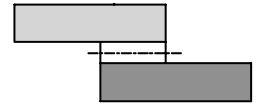
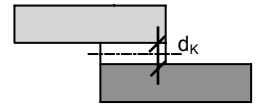


Bild 141 Spannungsverteilung an einem Pfad mittig in der Klebfuge mit einer Dicke von 1,0 mm



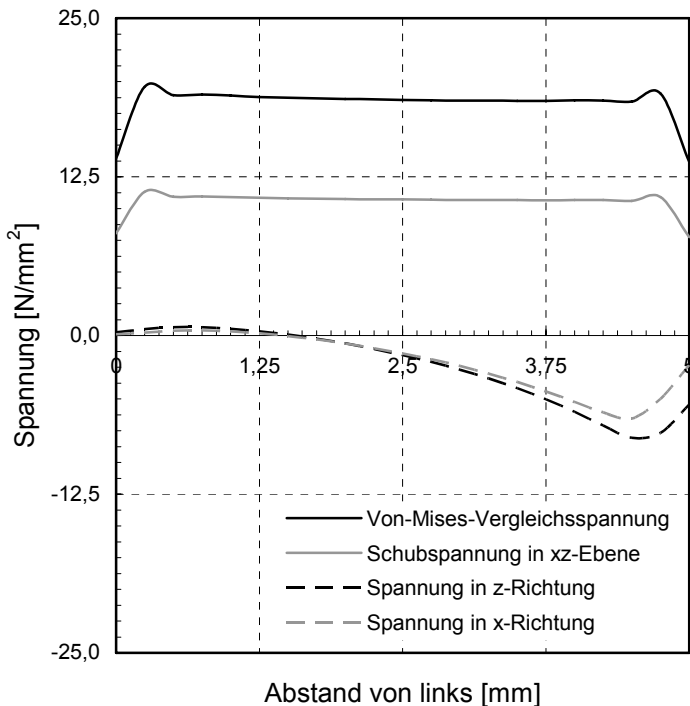
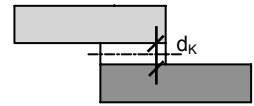


Bild 142 Spannungsverteilung an einem Pfad mittig in der Klebfuge mit einer Dicke von 0,2 mm.



Insgesamt zeigt sich, dass bei Variation der Klebschichtdicke schubbelastete Prüfkörper eine geringere Beeinflussung der Spannungsgrößen erfahren als zugbelastete Prüfkörper. Dünne Klebfugen unter Zug rufen einen deutlichen Anstieg der Spannungsspitzen hervor. Dagegen ergibt sich bei Schub ein nahezu gleichbleibender Spannungsverlauf. Für die praktische Umsetzung bedeutet dies, dass Klebfugen, die durch Zug beansprucht werden, mit mindestens 0,5 mm, besser sogar 1,0 mm dimensioniert werden sollen. Dagegen können reine schubbeanspruchte Klebfugen durchaus mit Fugendicken von 0,2 mm ausgeführt werden.

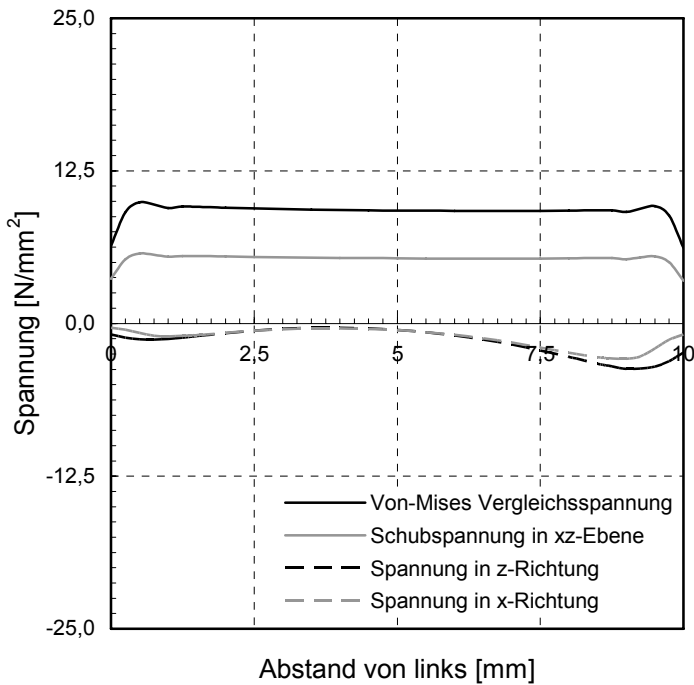


Bild 143 Spannungsverteilung an einem Pfad mittig in der Klebfuge bei einer Überlappungslänge von 10 mm.

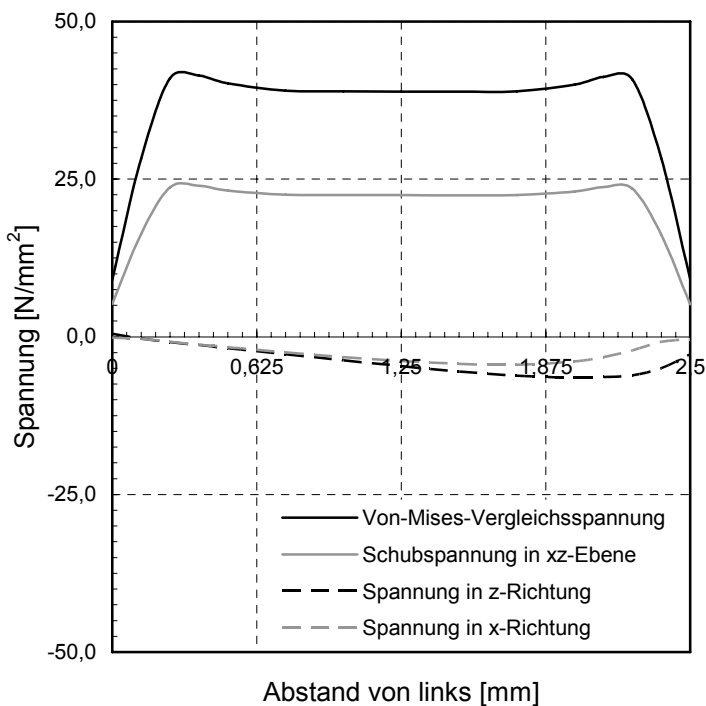
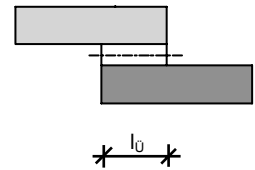
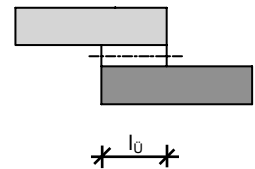


Bild 144 Spannungsverteilung an einem Pfad mittig in der Klebfuge bei einer Überlappungslänge von 2,5 mm. Zur Darstellung musste eine veränderte Skalierung der Achsen gewählt werden.



11 Bauteilversuche - Durchführung

11.1 Absturzsicherung

11.1.1 Grundlagen

Die Glasarchitektur fordert zunehmend filigraner wirkende Konstruktionen mit mehr Transparenz. Anwendungspotenziale für transparente Acrylatklebungen im Konstruktiven Glasbau finden sich beispielsweise in Absturzsicherungen, Überkopfverglasungen oder Glaslamellen.¹⁵⁹ Bauteilversuche dienen der Ergänzung kleinteiliger Prüfkörperversuche und dem Erfahren des Materialverhaltens in einer komplexen Konstruktion.

Eine Anwendungsmöglichkeit geklebter Verbindungen im Konstruktiven Glasbau ist das Kleben von Glas in Absturzsicherungen der Kategorie C1¹⁶⁰ der Technischen Richtlinie für absturzsichernde Verglasungen. In der Regel werden diese Gläser punktförmig gebohrt beziehungsweise punkt- oder linienförmig geklemmt gelagert.¹⁶¹ In Abhängigkeit von den Lagerungsbedingungen kann monolithisches Glas aus Einscheiben-Sicherheitsglas, Verbund-Sicherheitsglas sowie Mehrscheiben-Isolierglas verwendet werden.

11.1.2 Materialien und Klebstoffe

Für die Bauteilversuche an geklebten absturzsichernden Verglasungen wurden monolithische Einscheiben-Sicherheitsgläser in einer Dicke von 12 mm an Beschläge aus Edelstahl geklebt. Die Klebfläche der Edelstahlhalter war für diese Versuche poliert.¹⁶² Mit einer UV-Lampe wurde vorab die Atmosphärenseite des Glases ermittelt, um dort die Klebung vorzunehmen. Als Klebstoff wurde Photobond 4468

¹⁵⁹ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 12 ff.

¹⁶⁰ Gegen Absturz sichernde Verglasungen der Kategorie C werden nicht zur Abtragung horizontal wirkender Holmlasten herangezogen. Die Geländerausfachung der Kategorie C1 ist an mindestens zwei gegenüberliegenden Seiten linienförmig und/oder punktförmig zu lagern. Vergleiche hierzu TRAV 2003 sowie Weller 2007a, Seite 902 ff.

¹⁶¹ Bei punktförmig geklemmten Ausfachungen ist Verbund-Sicherheitsglas zu verwenden. Außerhalb des Regelungsbereiches der TRAV 2003 gibt es absturzsichernde Verglasungen der Kategorie C1, bei denen monolithische Einscheiben-Sicherheitsgläser punktförmig geklemmt werden. Verwendet werden dürfen sie erst nach Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung.

¹⁶² Angelehnt an Ausführungsvarianten mit geklemmten Haltern wurden für diese Versuche polierte Klebflächen gewählt.

verwendet. Die Klebfugendicke von 0,2 mm wurde über transparente Kunststoffabstandhalter hergestellt. Vor dem Klebstoffauftrag wurden die glas- und metallseitigen Klebflächen mit dem vom Klebstoffhersteller empfohlenen Reiniger DELOTHEN® EP gesäubert und entfettet. Die Aushärtung erfolgte mit der Lampe DELOLUX 03 für etwa 60 Sekunden.

11.1.3 Konstruktion und Geometrie

Untersucht wurden insgesamt vier Glasscheiben, zwei schmale Scheiben mit einer Größe von 0,5 m x 1 m und zwei breite Scheiben mit einer Größe von 1,4 m x 1 m. Jeweils an vier randnahen Stellen wurden die Scheiben an Halterungen mit einem abgerundeten Querschnitt geklebt. Die winkelförmigen Halterungen wurden über Schrauben an seitliche Stützen angeschlossen. Pro Seite wurden ein Anschluss mit einem horizontalen und ein Anschluss mit einem vertikalen Langloch ausgeführt.

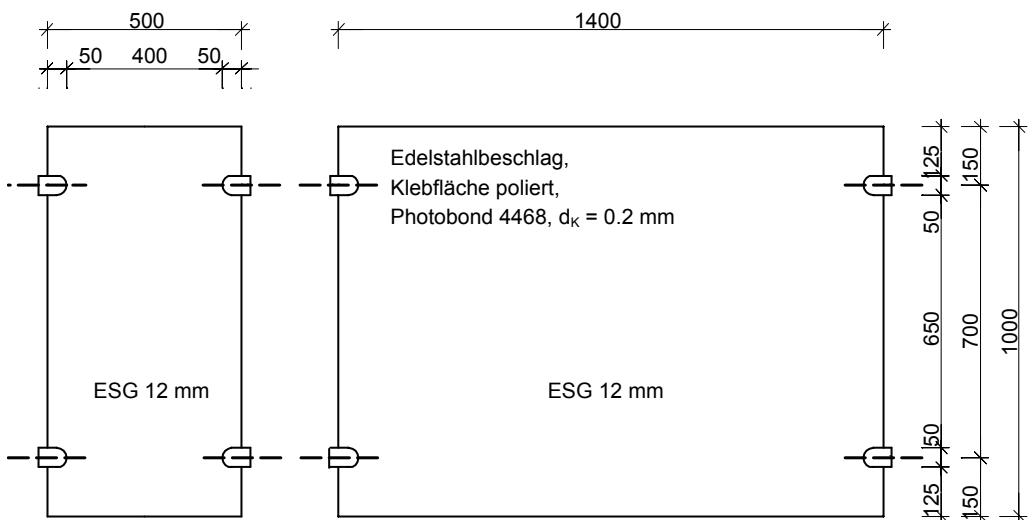


Bild 145 Geklebte Absturzsicherungen für Bauteilver-suche in zwei verschiedene-nen Scheibengrößen.

Maße in [mm]

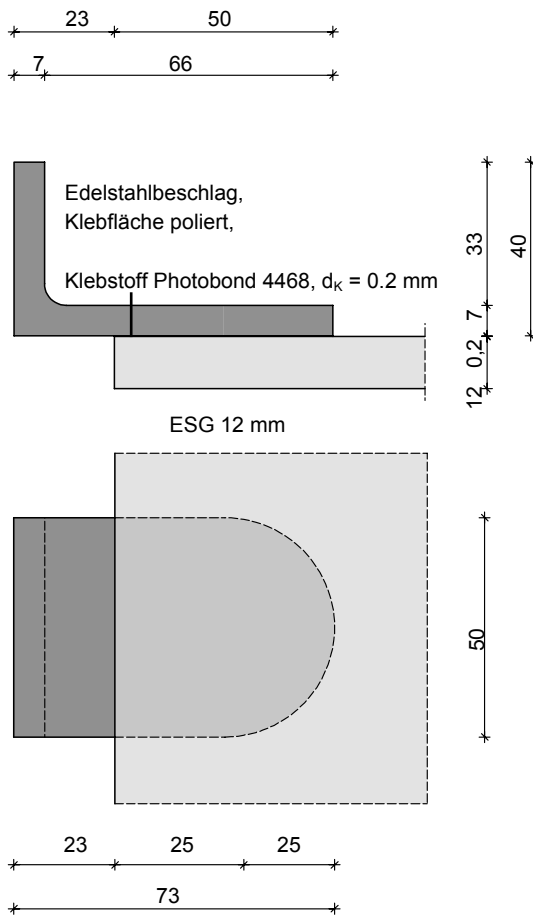


Bild 146 Querschnitt der auf das Glas geklebten Halterung (oben) und Ansicht durch das Glas (unten). Es ergibt sich je Befestigungspunkt eine Klebfläche von 2232 mm^2 mit einer Klebschichtdicke von $0,2 \text{ mm}$.

Maße in [mm]

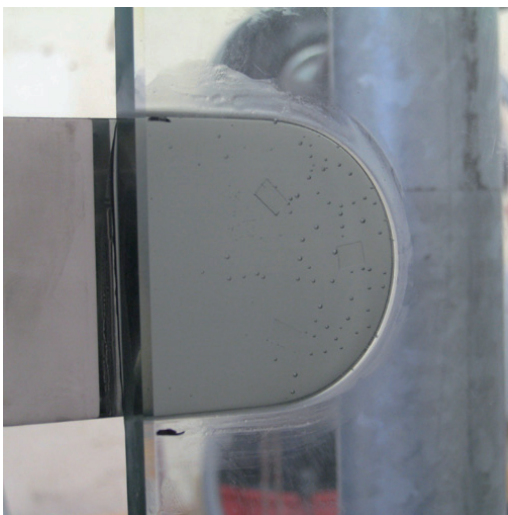


Bild 147 Klebung zwischen poliertem Edelstahlhalter und Glas. Erkennbar sind die transparenten Kunststoffabstandhalter sowie die eingeschlossenen Luftbläschen in der Klebung, die sich bei Einzelanfertigung nur schwer vermeiden lassen.

11.1.4 Bauteilversuche - Tragfähigkeit unter statischer Belastung

Gegen Absturz sichernde Verglasungen und ihre unmittelbaren Befestigungen sind auf ausreichende Tragfähigkeit bei statischer Belastung und bei stoßartigen Einwirkungen nachzuweisen. In der Tragfähigkeitsprüfung zur statischen Belastbarkeit wurden die Scheiben bis zur dreifachen charakteristischen Last aus Wind beansprucht. Dazu wurden die an den Halterungen hängenden Scheiben liegend durch Sandsäcke belastet. Jede Laststufe wurde mindestens fünf Minuten gehalten.

Scheibe	Laststufe	Flächelast ¹⁶³ q [kN/m ²]	Anzahl der Sandsäcke
0,5 m x 1 m	1	1,5	6
	2	3,0	12
	3	4,5	18
1,4 m x 1 m	1	0,9	10
	2	1,8	20
	3	2,7	30

Tafel 17 Laststufen der Tragfähigkeitsprüfung für die statische Belastung geklebter Absturzsicherungen. Durchschnittlich hat ein Sandsack ein Gewicht von 12,6 kg.

Die erste Prüfung einer schmalen Scheibe verlief erfolgreich. Sie konnte bis zur dreifachen charakteristischen Windlast beansprucht werden, ohne dass sichtbare Veränderungen an den Klebungen festgestellt wurden. Die zweite schmale Scheibe konnte ebenfalls mit der Maximallast beaufschlagt werden. Kurz nach Aufbringen der dritten Laststufe versagten jedoch an einer Längsseite beide Klebungen. In der darauffolgenden Prüfung der ersten breiten Scheibe versagten alle Klebungen, während die dritte Laststufe aufgebracht wurde. Auf die statische Prüfung der zweiten breiten Scheibe wurde verzichtet, um noch Erkenntnisse aus der anschließenden Pendelschlagprüfung gewinnen zu können.

¹⁶³ Die erhöhten Flächenlasten infolge Wind bei der kleinen Scheibe resultieren aus der Berücksichtigung der erhöhten Sogspitzen, die sich fast über die ganze Scheibe erstrecken. Vergleiche hierzu DIN 1055-4.



Bild 148 Geklebte Absturzsicherung unter Belastung mit Sandsäcken. Dies entsprach der dreifachen charakteristischen Last.

Die Klebungen versagten, obwohl unter der statischen Ersatzlast zuzüglich des Eigengewichts der Glasscheibe auf die Punkthalter eine deutlich geringere Beanspruchung wirkte als bei den unter Laborbedingungen hergestellten Prüfkörpern.¹⁶⁴ Es trat ein wechselseitiges adhäsives Versagen mit einem kohäsiven Übergangsbereich auf. In den nachfolgenden Prüfungen wurde daraufhin ein verstärktes Augenmerk auf eine gründliche Reinigung der Fügeteiloberflächen und eine verlängerte Aushärtezeit gelegt.¹⁶⁵

Scheibe	Nummerierung	Max. Laststufe	Klebversagen	Glasbruch
0,5 m x 1 m	1	3	nein	nein
	2	3	ja	nein
1,4 m x 1 m	3	3	ja	nein
	4	-	-	-

Tafel 18 Ergebnisse der Tragfähigkeitsprüfung aus statischer Belastung. Die vierte Scheibe wurde für die Pendelschlagprüfung aufgehoben.

¹⁶⁴ Für jede der vier Klebfugen ergab sich eine maximale Beanspruchung aus Eigengewicht und dreifacher charakteristischer Windlast von $0,47 \text{ N/mm}^2$. Die Prüfkörper, die mit der gleichen Fügeteiloberfläche und der gleichen Klebstoffdicke hergestellt wurden, erzielten in den Laborversuchen eine Festigkeit von $17,78 \text{ N/mm}^2$. Vergleiche hierzu Tasche 2007.

¹⁶⁵ Vergleiche hierzu Kapitel 11.1.7.

11.1.5 Bauteilversuche - Tragfähigkeit unter stoßartiger Belastung

Für den Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartigen Einwirkungen wurde in Anlehnung an die Technischen Richtlinien für absturzsichernde Verglasungen der Pendelschlagversuch nach EN 12600 angewandt. Die Scheiben wurden an den drei festgelegten Auftreffstellen mit einem Zwillingsreifen mit einer Masse von 50 kg und einem Reifendruck von 4,0 bar aus einer Fallhöhe von 450 mm belastet.¹⁶⁶ Die Scheiben wurden so in den Prüfraumen eingebaut, dass die Klebungen bei Stoß auf Zug beansprucht wurden. Zum erfolgreichen Bestehen der Pendelschlagprüfung darf die Verglasung weder vom Stoßkörper durchdrungen noch aus der Verankerung gerissen werden oder Bruchstücke, die eine Verletzungsgefahr darstellen, herausfallen. Da die Konstruktion den Einbaubedingungen vor Ort entsprechen sollte, wurde auf der Oberseite der Stützen ein idealisierter Handlauf angebracht.

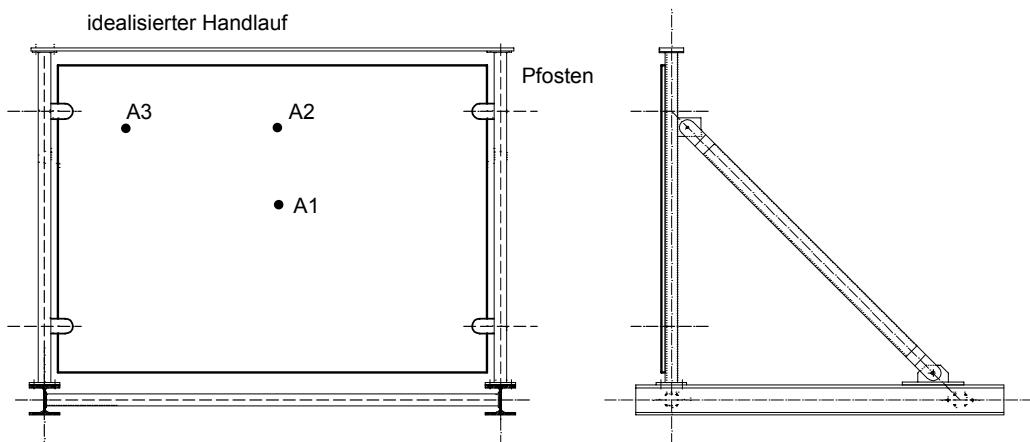


Bild 149 Prüfaufbau für Pendelschlagversuch. Die Glasscheibe wurde über vier Halter an Stützen befestigt und nach hinten abgestrebt, um die Kräfte aufzufangen. Die Auftreffpunkte des Pendels sind mit A1 bis A3 gekennzeichnet.

¹⁶⁶ Für Absturzsicherungen der Kategorie C1 ist eine Pendelfallhöhe von 450 mm anzusetzen, vergleiche hierzu TRAV 2003. Mehrere Auftreffstellen sind innerhalb einer relevanten Fläche so anzuordnen, dass sowohl das Glas als auch der Halter maximal beansprucht werden. Diese maßgebende Fläche ergibt sich aus einem Abstand von 250 mm zur Lagerung und von 500 mm zur Bodenhöhe.

In der Pendelschlagprüfung wurde die schmale Scheibe durch Stöße in Scheibenmitte und am oberen Rand belastet. Sie konnte dem Stoß in Scheibenmitte widerstehen, ohne Schädigungen an der Klebfläche oder an der Haltekonstruktion zu zeigen. Jedoch versagte diese Scheibe bei dem Stoß am oberen Rand. Die Klebungen waren größtenteils unbeschädigt. Bei der breiten Scheibe hatte der Stoß in Scheibenmitte einen Glasbruch und ein Versagen der Klebung zur Folge.

Scheibe	Nummerierung	Auftreffsstelle	Klebversagen	Glasbruch
0,5 m x 1 m	1	A1	nein	nein
	1	A2	nein	ja
1,4 m x 1 m	4	A1	ja	ja

Tafel 19 Ergebnisse der Pendelschlagprüfung an geklebten Absturzsicherungen der Kategorie C1.



Bild 150 Pendelschlagprüfung der geklebten Absturzsicherung. Links ist der Prüfstand mit der eingebauten, fast senkrecht zur Blickrichtung liegenden Glas-scheibe zu sehen. Rechts daneben steht das Pendel-schlaggerät mit dem Zwillingsreifen, der sich schon in seiner Ausgangslage für die Prüfung befindet.

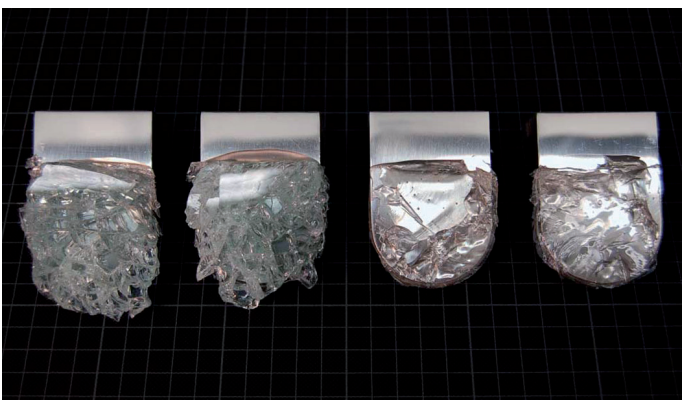


Bild 151 Beschläge der schmalen Scheibe nach der Pendelschlagprüfung. Die Klebungen sind größtenteils unzerstört, an ihnen haften Glasreste beziehungsweise Bruchstücke der ESG-Scheibe.

11.1.6 Messauswertung

Zur Auswertung der Prüfung unter statischer Last wurden die Dehnungen an ausgewählten Punkten unter Belastung aufgenommen. Es wurden jeweils drei einaxiale Dehnmessstreifen um den unteren und oberen Punkthalter angeordnet. Sie wurden horizontal und vertikal in das Feld zeigend und der dritte dazwischen liegend im Winkel von 45° eingebaut. In Scheibenmitte wurde ein biaxialer Dehnmessstreifen angeordnet. Zusätzlich befand sich ein Dehnmessstreifen horizontal in einem Abstand von 20 cm zum oberen Rand.¹⁶⁷ Da lediglich an acht Stellen gleichzeitig gemessen werden konnte, sollte diese Messstelle in der statischen Prüfung noch nicht zugeschaltet werden. Alle Dehnmessstreifen befanden sich jeweils auf der von der Klebung abgewandten Seite. So waren diese vor dem direkten Kontakt mit Sandsäcken oder Pendel geschützt. Die um die Punkthalter angeordneten Dehnmessstreifen lagen mit Mittelpunkt über dem projizierten Klebfugenrand.

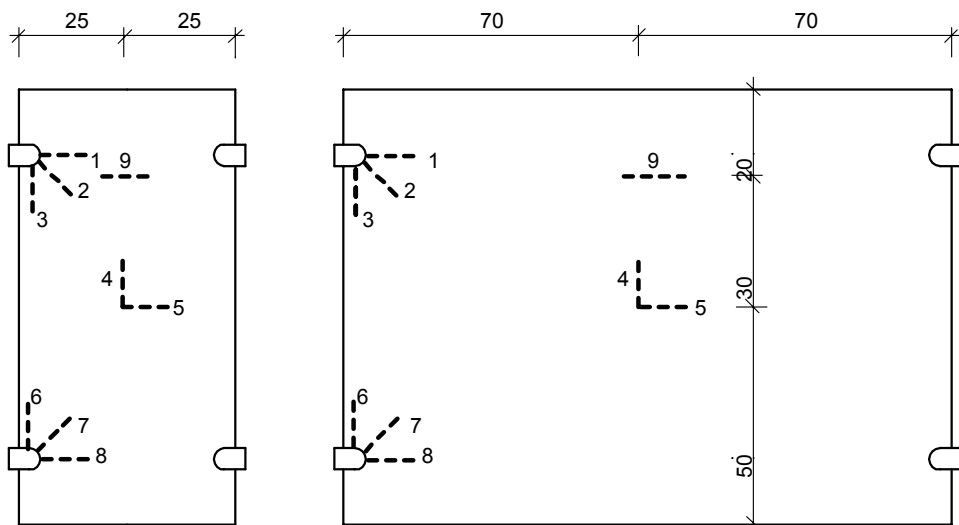


Bild 152 Anordnung der Dehnmessstreifen an der schmalen und der breiten Scheibe.

Maße in [cm]

¹⁶⁷ Diese Stelle ist ein Auftreffpunkt (A2) für den Pendelschlagversuch.

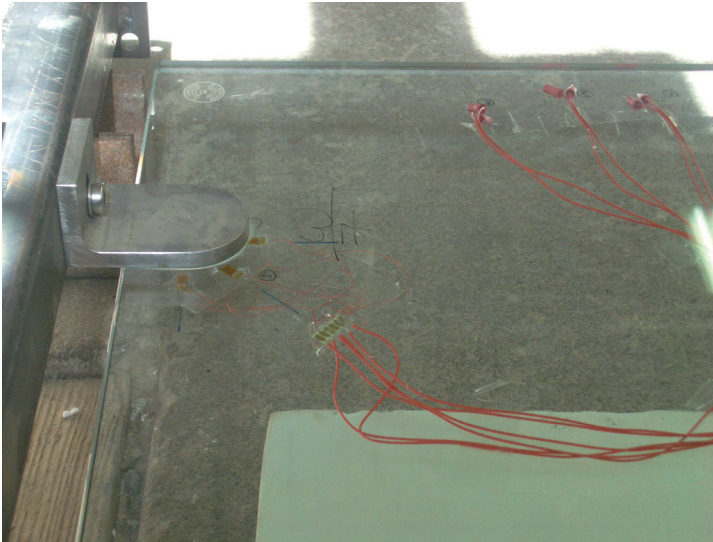


Bild 153 Geklebte Absturzsicherung im Liegen kurz vor dem Aufbringen der statischen Ersatzlast. Die Glasscheibe hing an den Halterungen, die Klebung wurde auf Zug beansprucht. Im Bild sind die Dehnmessstreifen 1 bis 3 zu erkennen. Sie sind um den Punkthalter angeordnet, liegen jedoch auf der dem Punkthalter abgewandten Seite.

Vor der Messung wurde die Glasscheibe in eine senkrechte Position gehoben und die Dehnungswerte auf Null gesetzt. Nach dem erneuten Hinlegen der Scheibe wurde die Messung gestartet. In den Werten, die durch die Dehnmessstreifen aufgenommen wurden, war somit das Eigengewicht der Scheibe als auch die äußere Belastung berücksichtigt.

Da die Abstände der Punkthalter zu den freien Rändern gleich groß waren, ergaben sich ähnliche Werte für die gleichgerichteten Messstellen um die oberen und unteren Punkthalter. Dies traf sowohl für die schmale als auch für die breite Scheibe zu. Auffällig für beiden Scheiben war der Vorzeichenwechsel bei den Messstellen, die jeweils um einen Punkthalter angeordnet waren. Im Halterbereich erfuhr die Glasplatte in Ebene der Dehnmessstreifen eine Dehnung in horizontaler Richtung, Zugspannungen entstanden. In vertikaler Richtung wurde das Glas an dieser Seite gedrückt, es lagen Druckspannungen vor.¹⁶⁸

Die Werte der mittleren Messpunkte spiegelten wie erwartet das Tragverhalten der Scheiben wieder. Bei der schmalen Scheibe waren die Spannungen in beiden Richtungen etwa gleich groß. Die breite Scheibe trug die Lasten ausschließlich in die horizontale Richtung ab.

¹⁶⁸ Vergleiche hierzu die Berechnung der Absturzsicherung in Kapitel 12.1.

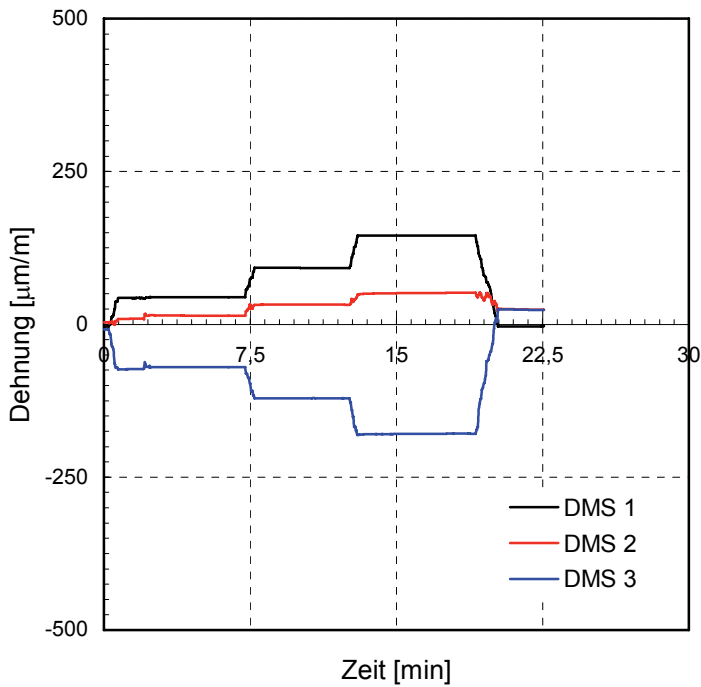


Bild 154 Dehnungswerte der schmalen Scheibe am oberen Punkthalter. Die Dehnungen in vertikaler und horizontaler Richtung weisen unterschiedliche Vorzeichen auf.

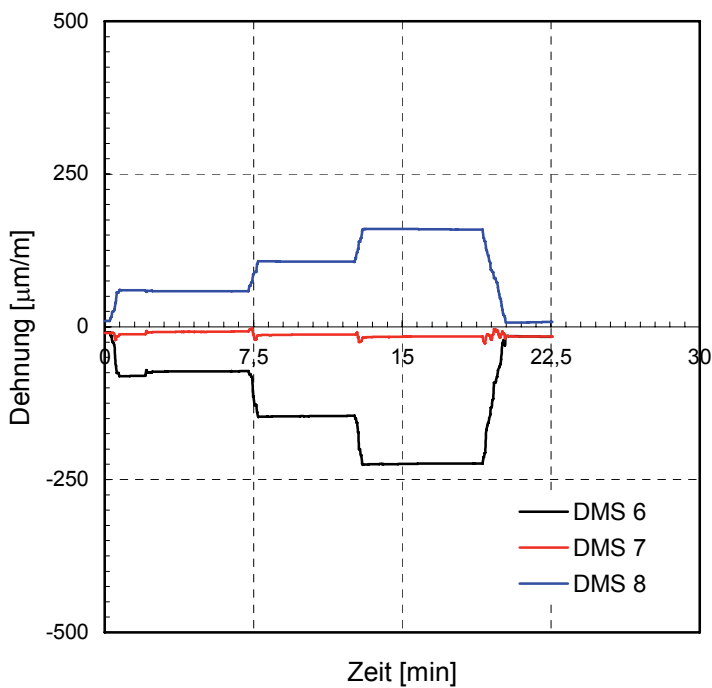
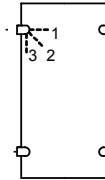
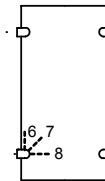


Bild 155 Dehnungswerte der schmalen Scheibe am unteren Punkthalter. Entsprechend den Messwerten am oberen Punkthalter weisen die Dehnungen in horizontaler Richtung positive Vorzeichen (Zug), in vertikaler Richtung negative Vorzeichen (Druck) auf.



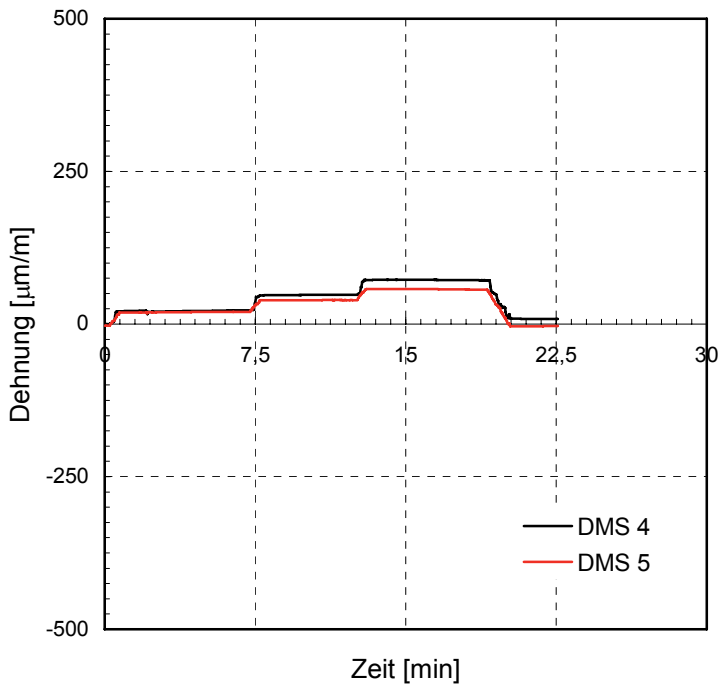


Bild 156 Dehnungswerte der schmalen Scheibe in Feldmitte. Der Lastabtrag findet gleichzeitig in beide Richtungen statt, die Dehnungswerte haben etwa die gleiche Größenordnung.

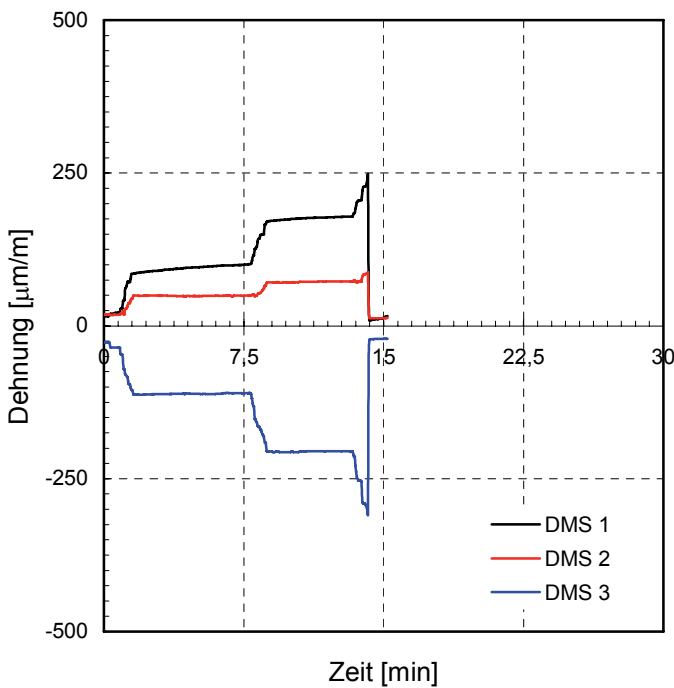
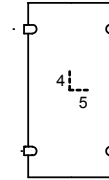
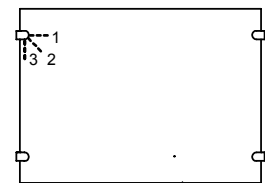


Bild 157 Dehnungswerte der breiten Scheibe am oberen Punkthalter. Die Klebungen versagten beim Aufbringen der dritten Laststufe. Auch bei dieser Messung weisen die Dehnungen in vertikaler und horizontaler Richtung unterschiedliche Vorzeichen auf.



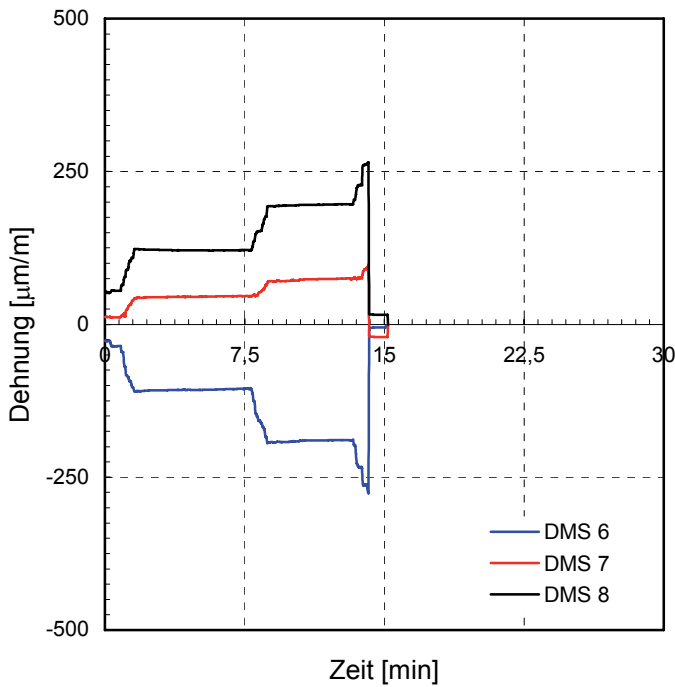


Bild 158 Dehnungswerte der breiten Scheibe an der unteren Halterung. Der schlagartige Abbruch der Messung entstand durch das Versagen der Klebungen beim Aufbringen der dritten Laststufe.

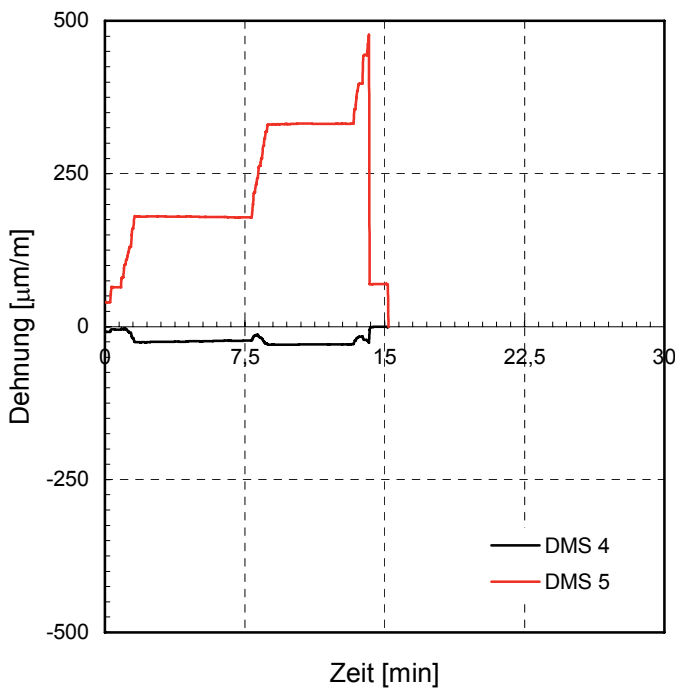
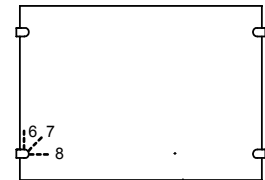
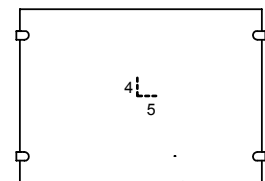


Bild 159 Dehnungswerte der breiten Scheibe in Feldmitte. Beim Aufbringen der dritten Laststufe versagten die Klebungen. Der Lastabtrag fand in horizontaler Richtung statt. Entsprechend steigen die Messwerte der Dehnungen in horizontaler Richtung.



11.1.7 Modifizierte Ausführung

Nachdem die ersten Prüfungen nicht wie erwartet ausfielen, wurden weitere Untersuchungen zur Absturzsicherung der Kategorie C1 der Technischen Richtlinie für absturzsichernde Verglasungen durchgeführt. Dabei blieb die Konstruktion mit vier punktförmig geklebten Halterungen weitestgehend gleich. Es wurden einige Veränderungen vorgenommen, die einerseits eine bessere Haftung des Klebstoffes und andererseits eine nachgiebigere Konstruktion bewirken sollten.

Die Prüfungen wurden an drei Scheiben aus Einscheiben-Sicherheitsglas mit den Abmessungen von 0,5 m x 1 m wiederholt. Vorab erfolgte die Ermittlung der Atmosphärenseite, um auf dieser Glasseite die Klebung anzuordnen. Verwendet wurden ebenfalls Beschläge aus Edelstahl, allerdings wurde die Klebfläche geschliffen beziehungsweise gedreht ausgeführt. Da sich der Klebstoff Photobond 4468 für geklebte Glas-Metall-Verbindungen weitestgehend bewährt hatte, wurde er weiterhin eingesetzt. Die Klebschichtdicke wurde auf 0,5 mm vergrößert, um auftretende Spannungsspitzen besser aufnehmen zu können und eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Fläche zu bewirken.¹⁶⁹ Die Schichtdicke wurde über Abstandhalter aus transparentem Kunststoff eingestellt. Vor dem Aufbringen des Klebstoffes wurden alle Klebflächen mit dem vom Klebstoffhersteller empfohlenen Reiniger DELOTHEN® EP gereinigt und entfettet. Die vergrößerte Dicke der Klebfuge erforderte ein zweistufiges Belichtungsverfahren zur Aushärtung. Mit dem Bestrahlungsgerät DELOLUX 03 wurde zunächst die Klebung 30 s mit 15-20 mW UVA-Intensität angehärtet. Im Anschluss folgte die Endhärtung mit 60 mW UVA-Intensität über einen Zeitraum von zwei Minuten. Die Strahlungsintensität wurde über den Abstand der Lampe zur Klebung eingestellt und mit dem Messgerät DELOLUXcontrol kontrolliert.

Zwischen Halter und Stütze wurde eine Zwischenlage aus einem Weichgummistreifen mit einer Dicke von 5 mm eingelegt. Das Material soll als Abfederung bei stoßartiger Belas-

¹⁶⁹ Vergleiche hierzu die Untersuchungen im Kapitel 10.1. Bei dünneren Klebfugen sind die Spannungsspitzen deutlicher ausgeprägt als bei dickeren Klebfugen. Für weitere Bauteilanwendungen werden Klebfugen mit Dicken von mindestens 0,5 mm empfohlen.

tung wirken. Gleichzeitig dient diese Zwischenschicht zum Ausgleich von Toleranzen, die Scheiben konnten nahezu zwangungsfrei in die starre Unterkonstruktion eingebaut werden. Um die vorhandene Konstruktion des Prüfaufbaus weiterhin nutzen zu können, musste der Halter um die Dicke der Zwischenlage verschoben werden. Somit vergrößerte sich die Klebfläche von 2232 mm^2 auf 2482 mm^2 .

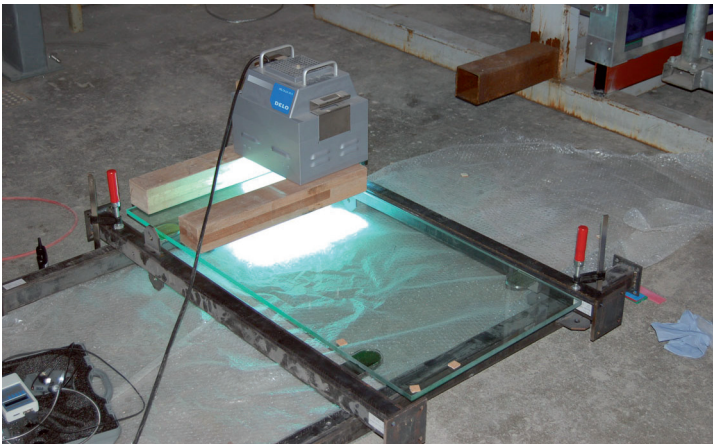


Bild 160 Aushärtung der Klebung. Für diese Konstruktion wurde ein zweistufiges Belichtungsverfahren mit An- und Endhärtung gewählt. Die Strahlungsintensität wurde mit dem Messgerät DELOLUXcontrol, am linken unteren Bildrand noch zu sehen, gemessen.



Bild 161 Auflagerpunkt der geklebten Absturzsicherung mit statischer Ersatzlast. Die angreifenden Windlasten wurden durch Belastung mit Sandsäcken simuliert. Zwischen Halter und Stütze wurde zusätzlich eine Zwischenschicht aus Weichgummi eingebaut.

Der Nachweis der statischen Belastbarkeit der Scheiben erfolgte entsprechend der vorhergehenden Versuche in drei Laststufen für jeweils fünf Minuten. Dabei wurden die in der realen Einbausituation auftretenden Windlasten durch Sandsäcken simuliert. Die Lagerung erfolgte so, dass die Scheibe an den Halterungen hing und die Klebfuge auf Zug belastet wurde.

Scheibe	Laststufe	Flächenlast q [kN/m ²]	Anzahl der Sandsäcke
0,5 m x 1 m	1	1,5	6
	2	3,0	12
	3	4,5	18

Tafel 20 Laststufen der Tragfähigkeitsprüfung für die statische Belastung geklebter Absturzsicherungen. Die charakteristische Windlast wird durch Sandsäcke simuliert, die ein durchschnittliches Gewicht von 12,6 kg besitzen.

Alle drei Scheiben konnten bis zur dreifachen charakteristischen Windlast belastet werden, ohne dass Veränderungen an den Klebungen festgestellt wurden oder ein Versagen eintrat.

Als Resultat dieser Prüfung der statischen Tragfähigkeit kann festgestellt werden, dass die geschliffene Oberfläche des Edelstahlhalters, die Schichtdicke vom 0,5 mm sowie die längere und stufenweise Aushärtung den entscheidenden Beitrag zum erfolgreichen Bestehen beisteuerten.

Scheibe	Nummerierung	Max. Laststufe	Klebversagen	Glasbruch
0,5 m x 1 m	1	3	nein	nein
	2	3	nein	nein
	3	3	nein	nein

Tafel 21 Ergebnisse der Tragfähigkeitsprüfung für statische Belastung. Alle drei geprüften Scheiben hielten der Belastung stand.

Der Nachweis der Tragfähigkeit unter stoßartiger Belastung wurde in Anlehnung an die Technischen Richtlinien für absturzsichernde Verglasungen mit dem Pendelschlagversuch nach EN 12600 durchgeführt. Die Belastung mit dem Pendelkörper erfolgte in der Scheibenmitte. Der Einbau der Scheiben erfolgte so, dass die Klebungen bei Stoß auf Zug beansprucht wurden.

Alle Scheiben gingen bei der Prüfung zu Bruch. Bei der ersten Scheibe versagten die Befestigungsschrauben der Halterungen der linken Seite. Auf diese Scheibe wird nicht näher eingegangen, da hier das Versagen den Schrauben geschuldet war und keinen Rückschluss auf die Tragfähigkeit der Klebfuge zuließ.

Bei Auswertung der Videoaufnahmen der Prüfung der zweiten Scheibe schien sich die untere linke Klebung zu lösen, während die Glasscheibe kurzfristig intakt blieb, bevor sie noch im hängenden Zustand zu Bruch ging. Beide linken Klebungen zeigten ein wechselseitig adhäsives Bruchbild mit ausgeprägten kohäsiven Anteilen. Die rechten Klebungen waren dagegen nahezu unzerstört, hier hafteten Glasbruchstücke am Halter.

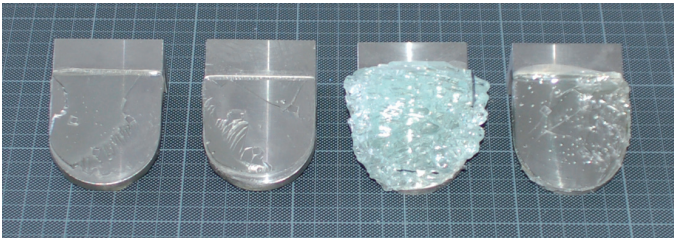


Bild 162 Halter mit Klebstoff- beziehungsweise Glasresten nach Pendelschlagprüfung der zweiten Scheibe. Von links: linker Halter oben und unten, rechter Halter oben und unten.

Bei der dritten Scheibe versagte die Klebung zuerst an beiden unteren Halterungen. Die Scheibe wurde als Ganzes durch den Schlag gelöst und zerbrach erst beim Aufprall auf den Boden. An beiden unteren Haltern war ein Adhäsionsversagen auf beiden Fügeteilen mit einem ausgeprägten kohäsiven Übergangsbereich festzustellen. Etwa 60 % des adhäsiven Versagens entfiel auf das Glassubstrat. Die Bruchbilder der oberen Halter zeigten ebenfalls ein wechselseitiges Adhäsionsversagen mit einem größeren, glasseitigen Anteil.



Bild 163 Zerstörte Klebfuge nach Pendelschlagprüfung. Im Bild ist die Halterung links unten (fotografiert wurde von hinten, deshalb eine andere Blickrichtung als in der Bezeichnung) die der dritten Scheibe zu sehen. Bei dieser Prüfung versagten erst die unteren Klebungen, bevor die Glasscheibe zerbrach.

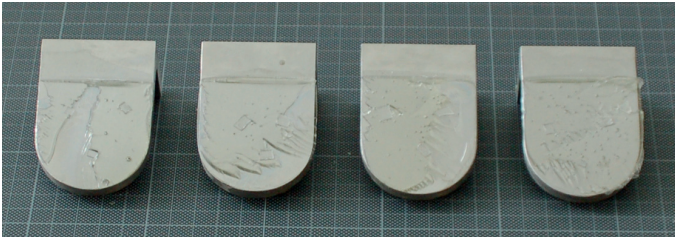


Bild 164 Halter mit Klebstoffresten nach Pendelschlagprüfung der dritten Scheibe. Von links: linker Halter oben und unten, rechter Halter oben und unten.

Da die geklebten Glasscheiben der statischen Belastung standhielten, kann von einer ausreichenden Tragfähigkeit der Klebungen unter ruhender Belastung ausgegangen werden. Für das erneute Versagen der Klebungen unter stoßartigen Einwirkungen können zwei Punkte als Ursache betrachtet werden: Trotz des Weichgummistreifens mit einer Dicke von 5 mm bildete der Halter weiterhin einen zu steifen Anschluss an den Rahmen. Zum anderen ist der hier verwendete Klebstoff Photobond 4468 insbesondere für ruhende Belastungen geeignet.

Im Pendelschlagversuch treten die Kräfte jedoch schlagartig und mit hohen Geschwindigkeiten auf.¹⁷⁰ Bei einer Fallhöhe von 450 mm treffen die Lasten mit einer Geschwindigkeit von 2,97 m/s auf die Glasscheibe auf.

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} = 2,97 \text{ m/s}$$

Gleichung 40

mit:

$$\begin{aligned} v &= \text{Aufprallgeschwindigkeit} \\ g &= \text{Erdbeschleunigung, } g = 9,81 \text{ m/s}^2 \\ h &= \text{Fallhöhe, } h = 450 \text{ mm} \end{aligned}$$

Es ist also ein schlagzähmodifizierter Klebstoff erforderlich, der unter hohen Belastungsgeschwindigkeiten ausreichende Verformungen in der Klebfuge zulässt.¹⁷¹

¹⁷⁰ Vergleiche hierzu Tautenhahn 2005, Seite 26.

¹⁷¹ In Ansätzen wird dieses Verhalten deutlich an den Untersuchungen an Substanzproben. Vergleiche hierzu Kapitel 7. In den geschwindigkeitsabhängigen Versuchen zeigte sich eine geringer werdende Streckdehnung bei steigender Geschwindigkeit. Obwohl die maximal gefahrene Geschwindigkeit von 500 mm/min noch von der Geschwindigkeit bei Pendelschlagversuchen entfernt ist, trat das Versagen bei höheren Kräften auf. Gleichzeitig wurden geringere Dehnungen erzielt.

Im Fahrzeugbau gibt es Untersuchungen zur Auslegung von Klebverbindungen unter Crashbelastung.¹⁷² Hier werden Klebstoffe gefordert, die eine hohe Klebfestigkeit und eine hohe Bruchdehnung kombinieren. Durch diese Eigenschaften können sie unter den Anforderungen der Crashbelastung die Trennung der Fügeile verhindern.

Hintergrund sind die molekularen Umlagerungsvorgänge im Klebstoff, die zeitabhängig sind und relativ langsam verlaufen.¹⁷³ Lokale Spannungsüberhöhungen können durch Relaxationsprozesse aus lokalen elastischen oder viskoplastischen Verformungen abgebaut werden. Tritt die Beanspruchung so schnell auf, dass die Molekülumlagerungen ihr nicht folgen können, können die Spannungsüberhöhungen nur noch teilweise abgebaut werden. Es ist ein sprödes Verhalten der Klebschicht mit einem verformungslosen Bruch zu erwarten.

Für schlagartige Belastungen sind gegenüber den Untersuchungen für statische Kurz- oder Langzeitbeanspruchung, bei denen die Belastungsgeschwindigkeiten um 3 bis 4 Zehnerpotenzen niedriger sind, zusätzliche Betrachtungen der Verformungseigenschaften von Polymerwerkstoffen erforderlich. An Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschinen können schlagartige Zugbeanspruchungen mit Geschwindigkeiten bis zu 5 m/s simuliert werden. Eine weitere Möglichkeit, das Verhalten von Klebverbindungen unter schlagartiger Belastung zu betrachten, bietet die Ermittlung der Schlagzähigkeit, wie sie im Folgenden durchgeführt wurde.

11.1.8 Experimentelle Ermittlung der Schlagzähigkeit

Zur Erklärung des Versagens nach dem Pendelschlagversuch und zur weiteren Verbesserung der geklebten Konstruktion wurde die Schlagzähigkeit geklebter Glas-Metall-Verbindungen experimentell ermittelt.

In Anlehnung an ISO 9653 wurde die Schlagzähigkeit mit einem Pendelschlagwerk an einer geklebten Verbindung überprüft. Seitens des Klebstoffherstellers wurden der Auf-

¹⁷² Vergleiche hierzu Brede 2006.

¹⁷³ Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 469 f. und Döpmeier 2007, Seite 11 f.

bau und die Geometrie der Prüfkörper für Glas-Metall-Klebung optimiert.¹⁷⁴ Um eine schlagartige Belastung auf die Glaskante und den unausweichlichen Glasbruch zu vermeiden, wurde die Anordnung der Fügeile so modifiziert, dass der Pendel senkrecht auf die Glasfläche prallt. Im engeren Sinne handelt es sich nicht mehr um einen Scherschlagversuch wie in ISO 9653 beschrieben, sondern eher um einen Schäl Schlagversuch. Durch die veränderte Schlagrichtung werden keine Kräfte parallel, sondern senkrecht zur Fläche erzeugt. Sie können als Schälkräfte bezeichnet werden. Für die Auslegung geklebter Absturzsicherungen ist diese Optimierung besonders geeignet, da sie für diese Anwendung die Beanspruchung des Schlages in Scheibenmitte und die Weiterleitung in die metallischen Halterungen im Kleinen simuliert.

Platte aus Edelstahl,
Klebläche gefräst,
15 x 12 x 5 mm

Acrylatklebstoff
Schichtdicke $d_K = 0,2 / 0,5$ mm

Floatglas 25 x 25 x 10 mm

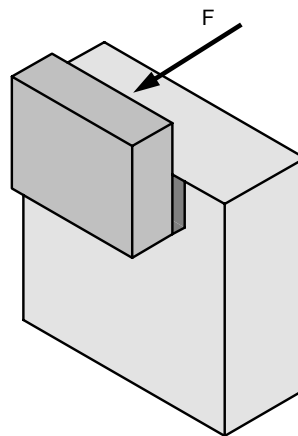


Bild 165 Prüfkörper zur Ermittlung der Schlagfestigkeit. Eine kleine metallische Platte wird mit einer Überlappungslänge von 5 mm an die größere Glasscheibe geklebt. Diese ist an ihrer Unterseite in die Prüfapparatur eingespannt. Die Kraft F tritt aus einer definierten Höhe mittig auf die Metallscheibe.

Untersuchungen wurden an Verbindungen mit drei Acrylatklebstoffen und jeweils zwei Klebstoffdicken durchgeführt. Neben den in dieser Arbeit ausführlich untersuchten Acrylatklebstoffen Photobond 4468 und Photobond GB485, wurde ein weiterer UV-härtender Klebstoff, PB VE 56903¹⁷⁵, in die Untersuchungen aufgenommen. Dieser wurde mit dem Ziel entwickelt, in Tieftemperaturbereichen mehr Flexibilität und eine verbesserte Schlagzähigkeit zu erreichen. Die Schichtdicken wurden in Anlehnung an die bereits durchge-

¹⁷⁴ Vergleiche hierzu DELO-Norm 35 in Weigel 2007.

¹⁷⁵ Vergleiche hierzu das Datenblatt Delo 56903.

fürten Versuche an Probekörpern und Bauteilen mit 0,2 mm und 0,5 mm gewählt. Die Edelstahlprüfkörper wurden auf der Klebseite gefräst, um durch die rauere Oberfläche mehr Haftung zu erzeugen. Spätere Anwendungen sollten eine entsprechende Oberflächenqualität aufweisen.

Die Klebflächen der Glasscheiben aus Floatglas und der Metallplättchen wurden vor dem Fügen mit DELOTHEN® EP gereinigt. Auf Grund der geringen Klebfläche, wurde auf Abstandhalter verzichtet und die Fugendicke mit einem Fühler-
 lehrenband eingestellt. Somit konnte die Schlagfestigkeit bei der geringen Klebfläche ohne störende Einflüsse ermittelt werden. Die Prüfungen erfolgten mit dem Zwick Pendelschlagwerk 5113 mit einer Schlagenergie von 1 J. Da erfahrungsgemäß hohe Streuungen bei den Versuchsergebnissen auftreten, wurden pro Reihe jeweils 10 Prüfkörper geklebt und geprüft.

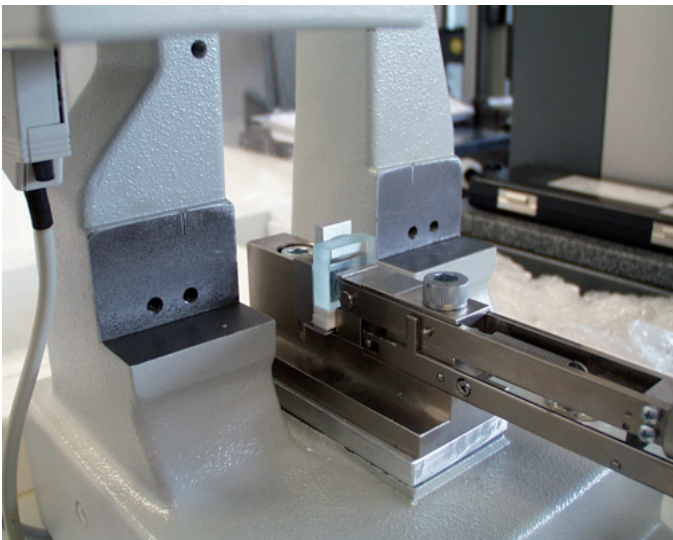


Bild 166 Versuchsanordnung mit dem Zwick Pendelschlagwerk 5113 mit eingespanntem Prüfkörper zur Ermittlung der Schlagfestigkeit. Das Glas ist in die Halterung eingespannt. Die kleinere Metallplatte befindet sich an der Rückseite des Glases. Auf diese schlägt der Pendel mit einer Energie von 1 J. Nach dem Auseinanderbrechen der Verbindung wird die Restenergie des Pendels beziehungsweise die Schlagarbeit aufgezeichnet.



Bild 167 Pendelschlagwerk Zwick 5113 zur Ermittlung der Schlagzähigkeit einer geklebten Glas-Metall-Verbindung. Untersucht wurden drei Acrylatklebstoffe mit jeweils zwei Schichtdicken. Die Fügeteile bestanden aus Floatglas und Edelstahl. Es wurden zehn Prüfkörper pro Versuchsreihe geprüft, da erfahrungsgemäß hohe Streuungen auftreten. Die Prüfungen wurden von der Firma DELO Industrie Klebstoffe durchgeführt.

Bei jedem Versuch wird neben der Klebfläche die verbrauchte Schlagarbeit beim Bruch der Probe protokolliert. Daraus lässt sich als Quotient der verbrauchten Schlagarbeit und der Klebfläche die Schlagarbeit beim Bruch bestimmen. Sie wird auch als Schlagzähigkeit bezeichnet.

$$a_n = \frac{A_n}{b_K \cdot l_K} \cdot 10^3$$

Gleichung 41

mit

a_n	Schlagzähigkeit in [kJ/m ²]
A_n	Schlagarbeit in [J]
b_K	Breite der Klebfuge in [mm]
l_K	Länge der Klebfuge in [mm]

Weiterhin sind die Bruchbilder festzuhalten, um eine Hilfestellung zur Interpretation der Ergebnisse zu bieten.

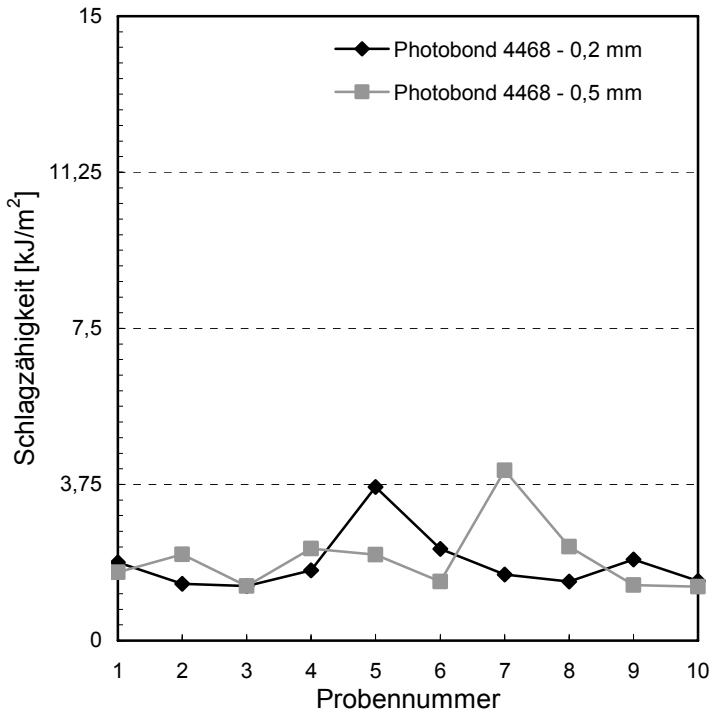


Bild 168 Ermittelte Schlagzähigkeit bei Verwendung des Acrylatklebstoffes Photobond 4468 für Schichtdicken von 0,2 mm und 0,5 mm. Insgesamt wurden jeweils zehn Prüfkörper untersucht. Es zeigt sich zwischen den beiden Klebfugendicken nur eine geringe Abweichung in der erreichten Schlagzähigkeit.

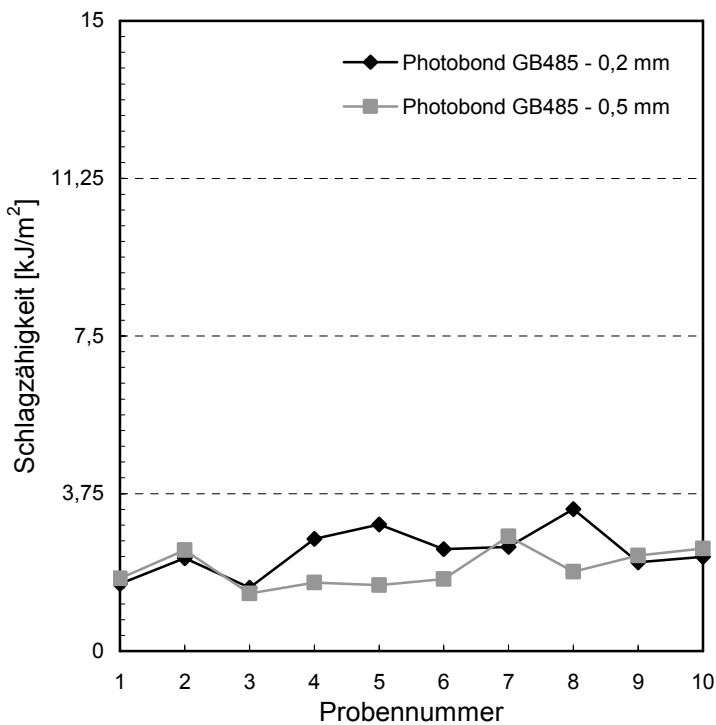


Bild 169 Ermittelte Schlagzähigkeit bei Verwendung des Acrylatklebstoffes Photobond GB485 für Schichtdicken von 0,2 mm und 0,5 mm. Insgesamt wurden jeweils zehn Prüfkörper untersucht. Bei den Klebverbindungen mit einer Schichtdicke von 0,2 mm liegen die Werte der Schlagzähigkeit etwas höher.

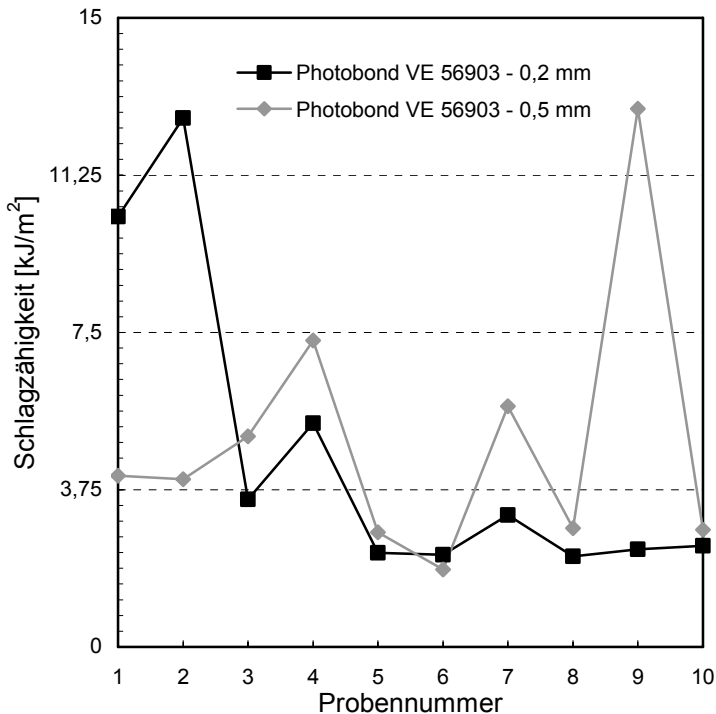


Bild 170 Ermittelte Schlagzähigkeit bei Verwendung des Acrylatklebstoffes Photobond VE 56903 für Schichtdicken von 0,2 mm und 0,5 mm. Aufgrund der hohen Abweichungen wurden die Ergebnisse der Proben 1 und 2 bei einer Klebfugendicke von 0,2 mm und der Probe 9 bei der Klebfugendicke von 0,5 mm in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt. Im direkten Vergleich untereinander weisen die Klebverbindungen mit einer Schichtdicke von 0,5 mm eine höhere Schlagzähigkeit auf.

Anhand dieser Prüfungen zeigten sich eindeutig deutlich höhere Mittelwerte für die Schlagzähigkeit des modifizierten Acrylatklebstoffes PB VE 56903 gegenüber den beiden in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffen Photobond 4468 und Photobond GB485. Wird hierbei noch eine Klebfugendicke von 0,5 mm eingestellt, so ist deutlich mehr Energie zum Zerstören der Verbindung erforderlich als bei Klebfugendicken von 0,2 mm. Bei Verwendung des Photobonds 4468 ist kaum ein bemerkenswerter Unterschied bei variierenden Klebfugendicken festzustellen. Der Photobond GB485 wies dagegen eine umgekehrte Tendenz auf. Bei dicker werdenden Fugenstärken sank die Schlagzähigkeit. Die Ergebnisse wiesen hohe Streuungen auf. Besonders ausgeprägt waren die Abweichungen bei dem Photobond VE 56903, obwohl die 'Ausreißer' in beiden Reihen nicht in die Auswertung einfließen.

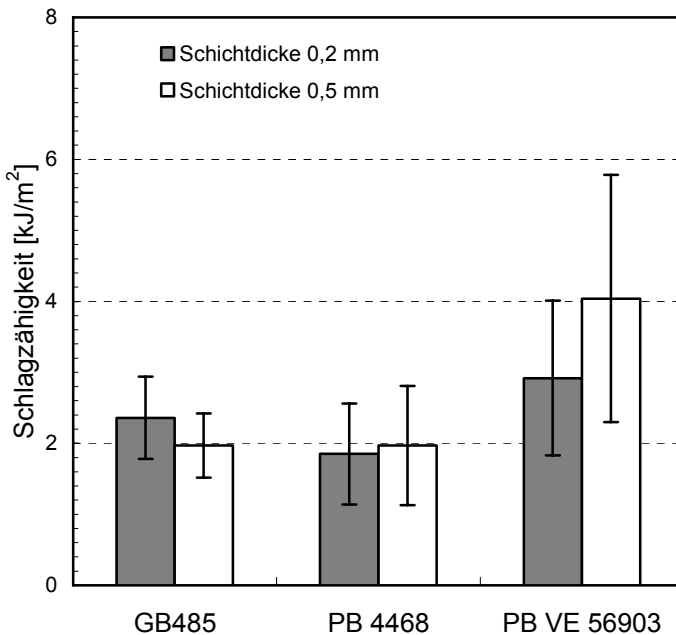


Bild 171 Mittelwerte und Standardabweichungen der Schlagzähigkeit unter Verwendung verschiedener Klebstoffe und Klebfugendicken. Deutlich ablesbar ist die höhere Schlagzähigkeit bei Verwendung des Klebstoffes PB VE 56903, die bei dicken Klebfugen eine weitere Steigerung erfährt. Jedoch weisen die Verbindungen mit diesem Klebstoff auch hohe Streuungen auf.

Für eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse werden die 5 %-Fraktilwerte bei einer Aussagewahrscheinlichkeit von 75 % ermittelt. Da die Streuungen der Ergebnisse bei allen Versuchsreihen hoch sind, wird von einer logarithmischen Normalverteilung ausgegangen.¹⁷⁶ Daraus ergeben sich die niedrigsten Fraktilwerte für den Photobond 4468. Bei diesem Klebstoff scheinen die Fugendicken nur einen geringfügigen Einfluss zu besitzen. Der Photobond GB485 liegt mit seinen 5%-Faktileten etwa im Bereich des Photobonds VE 56903. Der höchste Wert wird bei Klebungen erzielt, die mit dem Photobond VE 56903 und einer Fugendicke von 0,5 mm ausgeführt wurden.

¹⁷⁶ Bei geringer Streuung (Variationskoeffizient kleiner als 0,10) kann die Schätzung der unteren Faktileten unter Annahme einer Normalverteilung erfolgen. In den anderen Fällen ist die logarithmische Normalverteilung anzusetzen. Vergleiche hierzu IfBt 1985, Seite 2-7.

	Schichtdicke [mm]	Schlagzähig- keit [kJ/m ²]	Standard- abweichung s [kJ/m ²]	5%-Fraktile R _{u,5} [kJ/m ²]	Bruchbild
Photobond 4468	0,2	1,85	0,71	0,92	wechselseitig adhäsiv
	0,5	1,97	0,84	0,87	
Photobond GB485	0,2	2,36	0,58	1,36	einseitig adhäsiv (metallseitig)
	0,5	1,97	0,45	1,20	
Photobond VE 56903	0,2	2,92	1,09	1,38	wechselseitig adhäsiv
	0,5	4,04	1,74	1,48	

Tafel 22 Ergebnisse der Ermittlung der Schlagzähigkeit für die Acrylate Photobond 4468, Photobond GB485 und Photobond VE 56903 in Abhängigkeit der Schichtdicken von 0,2 mm und 0,5 mm.

Aufgrund dieser Versuche ist die schlagzähmodifizierte Variante, der Photobond VE 56903 für lastabtragende Klebungen von Absturzsicherungen zu favorisieren. Dieser Klebstoff vermag eher die schlagartigen und mit hoher Geschwindigkeit auftreffenden Kräfte zu übertragen und gleichzeitig die hohen, durch den Aufprall erzeugten Verformungen aufzunehmen.

11.2 Überkopfverglasung

11.2.1 Grundlagen

Nach den geltenden Richtlinien können Überkopfverglasungen zwei-, drei- und vierseitig linienförmig, punktförmig geklemmt oder punktförmig gebohrt gelagert werden. Die Wahl des Glases ist von der Lagerungsart abhängig. Es darf Drahtglas, VSG aus Floatglas beziehungsweise VSG aus TVG nach allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung verwendet werden.¹⁷⁷ Hintergrund sind die besonderen Anforderungen - Tragfähigkeit bei Glasbruch und Schutz vor herabstürzenden Glassplittern - im Hinblick auf darunter liegenden Verkehrsflächen. Diese geforderte Resttragfähigkeit wird im Bauteilversuch unter reduzierter Last und über einen festgelegten Zeitraum nachgewiesen.

11.2.2 Materialien und Klebstoffe

Angelehnt an die Anforderungen nach TRPV¹⁷⁸ für Überkopfverglasungen wurde eine Verbund-Glasscheibe aus 2 x 8 mm TVG mit dazwischengelegter PVB-Folie in 1,52 mm Dicke auf vier Punkthalter aus gedrehtem Edelstahl mit einem Durchmesser von 60 mm geklebt. Insgesamt wurden vier Glasscheiben hergestellt. Es sollte stets eine außen liegende Atmosphärenseite des Glases mit dem Punkthalter verklebt werden. Es zeigte sich jedoch bei Überprüfung mit der UV-Lampe, dass bei einer Verbundglasscheibe außen zwei Badseiten vorhanden waren, so dass hier von der Vorgabe abgewichen werden musste. Diese wurde für die Freibewitterung verwendet. Die weiteren drei Scheiben konnten auf der Atmosphärenseite geklebt werden.

¹⁷⁷ Überkopfverglasungen mit linienförmiger Lagerung beziehungsweise mit punktförmiger Randklemmung - nur für Sogbelastung - werden in der TRLV 1998 beziehungsweise TRLV 2006 geregelt. Letztere war allerdings zum Zeitpunkt der Versuche noch nicht in allen Bundesländern eingeführt. Punktförmig gebohrte oder geklemmte Überkopfverglasungen sind - wenn in dem entsprechenden Bundesland eingeführt - nach TRPV 2006 geregelt, beziehungsweise bedürfen einer Zustimmung im Einzelfall oder einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung. Zusätzliche Anforderungen werden an Überkopfverglasungen gestellt, die planmäßig begehbar oder für Reinigungs- und Wartungszwecken betretbar sind, vergleiche hierzu Weller 2007a, Seite 900 f. und TRAV 2006, Abschnitt 1.4.

¹⁷⁸ Vergleiche hierzu TRPV 2006, Abschnitt 2.1, Seite 1.

Als Klebstoff wurde der Photobond 4468 genutzt. Die Klebschichtdicke beträgt einheitlich 0,5 mm und wurde mit Hilfe transparenter Kunststoffabstandhalter eingestellt. Alle Klebflächen wurden vor dem Auftrag des Klebstoffes sorgfältig mit dem seitens des Klebstoffherstellers empfohlenen Reiniger DELOTHEN® EP gesäubert und entfettet.

Da die PVB-Folie des VSG keine UV-Strahlung durchlässt, musste die Aushärtung mit sichtbarem Licht und verlängerten Bestrahlungszeiten erfolgen. Die Aushärtung wurde zweistufig mit dem Bestrahlungsgerät DELOLUX 03 vorgenommen. Zunächst wurden die Klebungen drei Minuten angehärtet, danach für etwa vier Minuten zur vollständigen Aushärtung nochmals mit höherer Intensität bestrahlt.¹⁷⁹

11.2.3 Konstruktion und Geometrie

Für die Überkopfverglasung wurde eine Konstruktion gewählt, die beispielsweise als Vordach eines Gebäudes eingesetzt werden könnte. Eine Glasscheibe mit den Abmessungen 1 x 2 m wurde über vier punktförmige Halter an Konsolen befestigt.

Diese Konsolen konnten so in der Lage verändert werden, dass sich einmal eine Konstruktion mit aufliegender Glasscheibe und nach dem Umbau eine Konstruktion mit abgehängter Glasscheibe ergab. Die Neigung wurde mit 3,8° an die Erfordernisse einer Überkopfverglasung zur Entwässerung angelehnt. Zur Wiederverwendung der Konsolen nach Herstellung und Prüfung wurden die Auflager um ein Quadratrohrstück als Montageprofil erweitert.

¹⁷⁹ Acrylate gehören zu den Klebstoffen, die die größte Reaktionsschwindigkeit aufweisen. Daher empfiehlt es sich große Klebflächen stufenweise auszuhärten, um Eigenspannungen in den Klebfugen zu reduzieren. Vergleiche hierzu Kapitel 4.1.

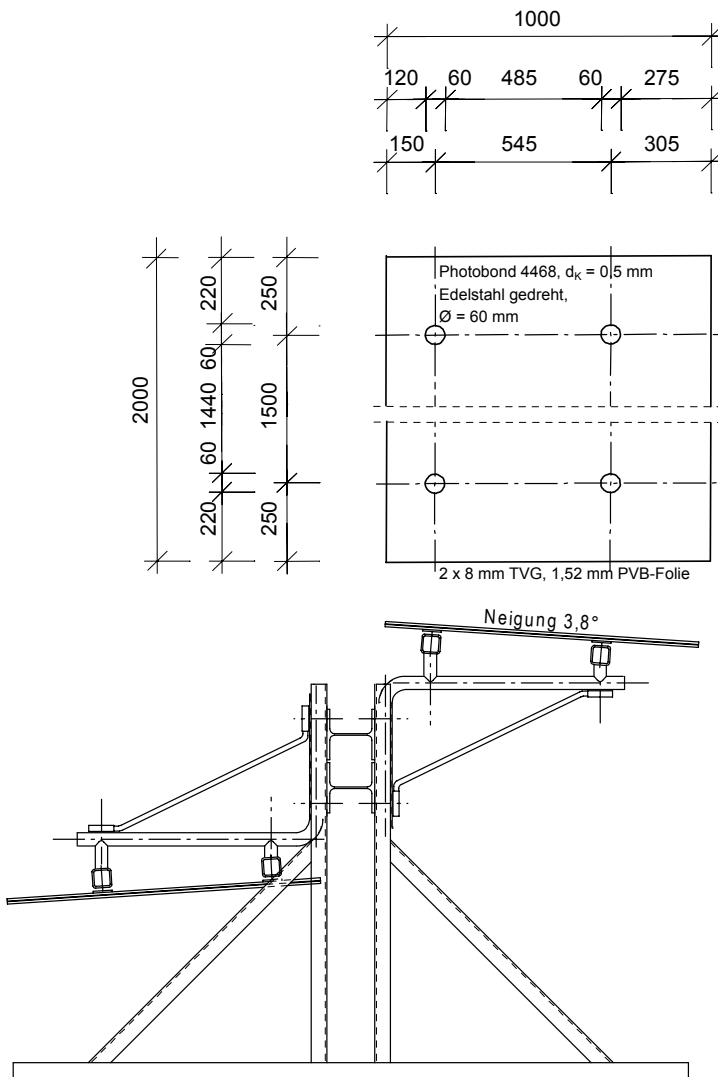


Bild 172 Prüfstand zur Tragfähigkeits- und Resttragfähigkeitsprüfung der geklebten Überkopfverglasung. Die Überkopfverglasung mit einer Verbundglasscheibe von 1 m x 2 m ist vierfach punktförmig geklebt. Links ist die abgehängte Überkopfverglasung, rechts die aufliegende Konstruktion dargestellt.

Maße in [mm]

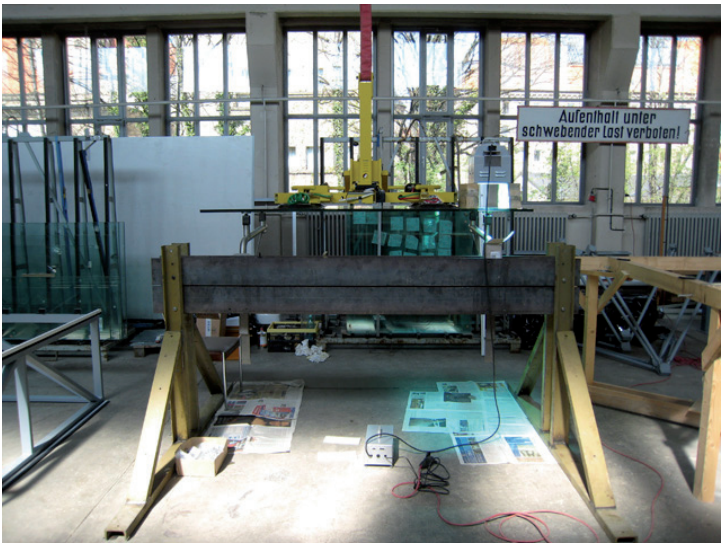


Bild 173 Überkopfverglasung mit aufliegender Glasscheibe von hinten. Hier ist die Konstruktion während der Herstellung der Klebungen zu sehen. Rechts auf der Scheibe befindet sich die eingeschaltete UV-Lampe, die den Klebstoff aushärtet. Bis zur vollständigen Aushärtung aller vier Klebflächen wurde die Scheibe zusätzlich von oben gesichert.



Bild 174 Überkopfverglasung mit abgehangter Glasscheibe von vorne. Durch den Umbau der beiden Konsolen, die an Stahlträger befestigt sind, konnte die Prüfeinrichtung für beide Varianten genutzt werden. Im Hintergrund liegen einige Sandsäcke für die Tragfähigkeitsprüfung bereit.

Tafel 23 Übersicht der geklebten Überkopfverglasungen mit Einteilung in Lagerungsarten.

Überkopfverglasung	Glasscheibe	Glasseite	Beanspruchung
1 m x 2 m 2 x 8 mm TVG, 1,52 mm PVB-Folie	aufliegend 	Atmosphärenseite	Trag- und Resttragfähigkeit
		Atmosphärenseite	Freibewitterung
	hängend 	Atmosphärenseite	Trag- und Resttragfähigkeit
		Badseite	Freibewitterung

11.2.4 Bauteilversuche - Prüfung der Tragfähigkeit

In der Tragfähigkeitsprüfung wurden beide Systeme der geklebten Überkopfverglasungen bis zur dreifachen charakteristischen Last geprüft. Die charakteristische Flächenlast mit $0,93 \text{ kN/m}^2$ ergibt sich aus Schnee- und Windlasten, die bei einem Einbau im Freien angreifen würden.¹⁸⁰ Die Lasten wurden durch Sandsäcke simuliert. Jede Laststufe wurde mindestens fünf Minuten gehalten. Infolge der aufgebrachten Belastung wurden die Klebungen der aufgeklebten Überkopfverglasung auf Druck beansprucht, die Klebungen der abgehängten Überkopfverglasung wurden einer Zugbeanspruchung ausgesetzt.

Scheibe	Laststufe	Flächenlast $q \text{ [kN/m}^2\text{]}$	Anzahl der Sandsäcke
1 m x 2 m	1	0,93	15
	2	1,86	30
	3	2,79	45

Tafel 24 Laststufen der Tragfähigkeitsprüfung an geklebten Überkopfverglasungen. Durchschnittlich hat ein Sandsack ein Gewicht von 12,6 kg.



Bild 175 Überkopfverglasung mit abgehängter Glasscheibe unter dreifacher Bemessungslast, die mit Sandsäcken simuliert wurde und über einen Zeitraum von mindestens 5 min gehalten wurde.

¹⁸⁰ Die maßgebende Belastung resultiert aus der Schneelast plus der halben Winddrucklast. Vergleiche hierzu DIN 1055-4 und DIN 1055-5 sowie TRLV. Eine Erhöhung der Belastung in den Rand- und Eckbereichen durch Windsogspitzen oder Eislasten wurde für die Prüfung vernachlässigt.

Beide Arten der geklebten Überkopfverglasung, sowohl die aufliegende als auch die abgehängte, haben die Tragfähigkeitsprüfung unter dreifacher Bemessungslast erfolgreich bestanden. Während der Prüfung ging keine Glasscheibe zu Bruch. Es wurden nach einer visuellen Prüfung keine Schäden oder Veränderungen an den Klebungen festgestellt.

11.2.5 Bauteilversuche - Prüfung der Resttragfähigkeit

In der Resttragfähigkeitsprüfung wurden die Scheiben mit einer reduzierten Last von $0,5 \text{ kN/m}^2$ belastet, die ersatzweise durch acht gleichmäßig verteilte Sandsäcke simuliert wurde. Durch Anschlagen beider Scheiben der Verbund-Sicherheitsglasscheibe wird ein ungünstiger Rissverlauf herbeigeführt. Nach Bruch der Verglasung wird die aufgebrachte Last für 24 h gehalten. In dieser Zeit darf die Verglasung weder komplett versagen noch dürfen Bruchstücke der Verglasung herunterfallen.¹⁸¹

Die aufliegende Überkopfverglasung wurde unter Belastung an der Scheibenkante mittig der Längsseite angeschlagen.¹⁸² Es entstand ein Riss in der unteren Glasscheibe über die volle Scheibenbreite. Das Anschlagen der oberen Scheibe in der Mitte der Querseite hatte einen Riss in der Scheibenmitte parallel der kurzen Seite zur Folge. Beide Risse lagen somit in ungünstigster Weise übereinander. Die Prüfung wurde nach drei Wochen abgebrochen, ohne dass dabei weder die Verglasung oder die PVB-Folie versagten, noch Bruchstücke aus der Verglasung heruntergefallen waren.

Die abgehängte Überkopfverglasung wurde in gleicher Weise angeschlagen, womit ein ähnlich ungünstiger Rissverlauf entstand. Hier wurde die Resttragfähigkeitsprüfung nach 48 h abgebrochen. Auch diese Verglasung bestand die Prüfung erfolgreich.

¹⁸¹ Die Anforderungen hinsichtlich der Resttragfähigkeit hängen vom Bauteil und der jeweiligen Einbausituation ab und müssen für jeden Einzelfall mit der Bauaufsichtsbehörde abgestimmt werden. Für diese Anwendung wurde eine typische Vorgangsweise gewählt. Als Belastung ist die halbe Schneelast, mindestens jedoch $0,5 \text{ kN/m}^2$ anzusetzen.

¹⁸² Die Vorgehensweise simuliert den Hergang, dass unter vorhandener Flächenlast, wie beispielsweise Schnee, die Verglasung beschädigt wurde.

Die Klebungen beider Verglasungen nahmen durch das Anschlagen der Scheiben keinen Schaden. Trotz des in der Glasscheibe durchgehenden Risses blieb die Klebfläche ohne sichtbare Veränderungen und weiterhin tragfähig.



Bild 176 Resttragfähigkeitsprüfung der Überkopfverglasung mit aufliegender Glasscheibe. Die VSG-Scheibe wurde von unten und oben angeschlagen, so dass ein ungünstiger Rissverlauf entstand. Belastet mit einer reduzierten Flächenlast erfüllte die Verglasung die Auflage, mehr als 24 h ohne Versagen oder herunterfallende Glasstücke in dieser Lage zu verbleiben.



Bild 177 Resttragfähigkeitsprüfung der Überkopfverglasung mit abgehängter Glasscheibe. Beide Scheiben der VSG-Verglasung wurden angeschlagen. Die defekte Verglasung hielt der Belastung 48 h lang stand und erfüllte die Anforderungen.

11.2.6 Messauswertung

Um die Dehnungen unter Belastung aufzeichnen zu können, wurden an den Scheiben, die der Tragfähigkeitsprüfung unterzogen wurden, insgesamt sieben Dehnmessstreifen angebracht. Sie befanden sich jeweils auf der von der Klebung abgewandten Seite. Drei einaxiale Dehnmessstreifen wurden um den vorderen Punkthalter angeordnet. Zwei weitere

waren im rechten Winkel um den hinteren Punkthalter angeordnet. Mittig zwischen den vier Punkthaltern wurde ein zweiachsender Dehnmessstreifen angeklebt. Zur Kontrolle einer gleichmäßigen Lastverteilung wurden an die Konsolträger der abgehängten Konstruktion zwei Wegaufnehmer neben den beiden vorderen Punkthaltern angeordnet. Die gemessenen Werte dienten zur Kontrolle einer symmetrischen Lastverteilung. Da sie hauptsächlich aus der Verformung der Metallkomponenten bestanden, wurden sie nicht weiter dokumentiert.

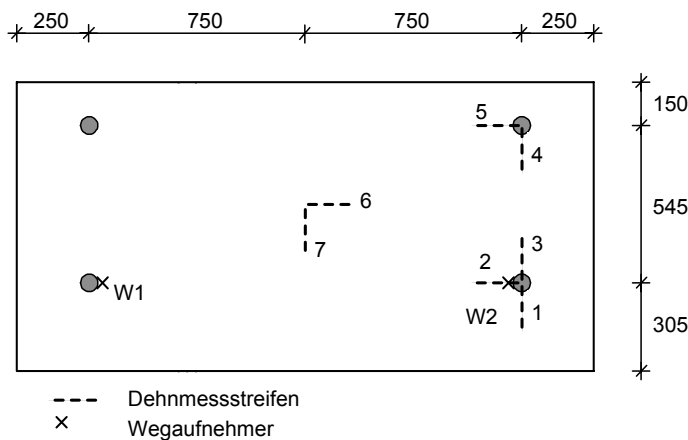


Bild 178 Anordnung der Dehnmessstreifen und Wegaufnehmer. Es wurden sieben Dehnmessstreifen pro Scheibe (1 - 7) und zusätzlich bei der abgehängten Überkopfverglasung zwei Wegaufnehmer (W1, W2) angebracht.

Maße in [mm]

Gemessen wurden die Dehnungen, die sich nach Aufbringen der Ersatzlast für Schnee und Wind ergaben. Da die Ausgangswerte der Messung nach dem Einbau der Scheibe, aber vor Belastung genullt wurden, ist der Anteil aus Eigengewicht nicht in die Werte eingeflossen. Für die FE-Berechnung war der Einfluss des Eigengewichtes zusätzlich zu berücksichtigen.

Die Dehnmessstreifen liegen auf der von der Klebung abgewandten Seite. Dadurch liegen sie bei der abgehängten Glasscheibe auf der Scheibenunterseite, bei der aufliegenden Verglasung auf der Scheibenoberseite. Durch die unterschiedliche Lage werden sie bei gleicher Last auf Zug und bei der anderen Konstruktion auf Druck belastet.

Bei der Betrachtung der Werte am vorderen Punkthalter fällt ein recht gleichmäßiges Bild der drei Dehnmessstreifen auf. Der Dehnmessstreifen 2, der parallel zur langen Kante lag, wies höhere Dehnungen auf als die beiden anderen. In die-

se Richtung erfolgt ein größerer Lastabtrag. Dabei fällt der Unterschied bei aufliegender Glasscheibe deutlicher aus.

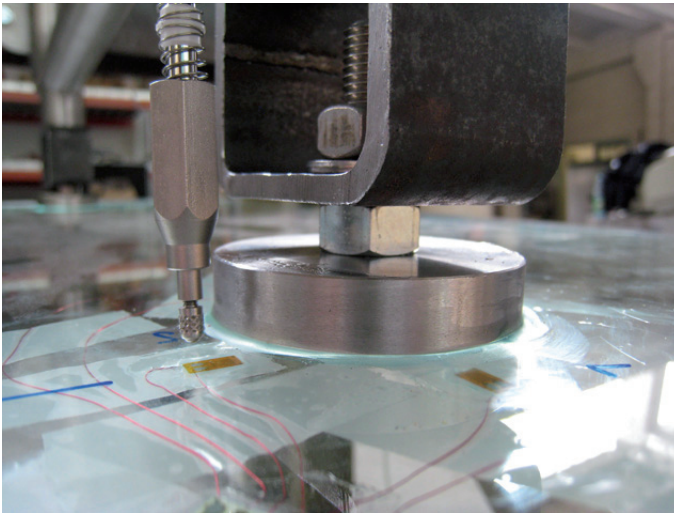


Bild 179 Vorderer geklebter Punkthalter mit Dehnmessstreifen und Wegaufnehmer. Die Dehnmessstreifen wurden auf der von der Klebung abgewandten Seite genau über der Kante angebracht. Zu sehen ist der Dehnmessstreifen 1 und 2 sowie der Wegaufnehmer W2.

Für die Werte am hinteren Punkthalter wiederholt sich die Betrachtung. Die Werte für die Dehnungen parallel zur langen Kante lagen bei der aufliegenden Scheibe deutlich höher als bei der hängenden Scheibe. Für die Werte senkrecht dazu war das Verhältnis umgekehrt. Am Mittelpunkt der Scheiben zeigen die Messungen des Dehnmessstreifens 6 konträre Ergebnisse. Dabei ergab sich ein ungewöhnlich niedriger Anstieg der Dehnungen von der zweiten zur dritten Laststufe. Diese Werte sind mit Vorsicht zu verwenden.

Es wurde versucht, die Sandsäcke gleichmäßig über die gesamte Scheibe zu verteilen. Dennoch wurde sicherlich keine solch gleichmäßige Verteilung erzeugt wie bei Berechnungen angesetzt wird. Besonders bei der hängenden Scheibe musste auf die oben liegenden Punkthalter und Konsolen Rücksicht genommen werden. Daraus ergab sich, dass mehr Sandsäcke im Feld lagen als auf dem auskragenden Teil des Glases.

Weiterhin ist festzuhalten, dass einige Kurvenverläufe einen geringen Anstieg der Dehnungen innerhalb der einzelnen Laststufen aufweisen. Dies kann auf die Kriechneigung der PVB-Folie zurückgeführt werden.

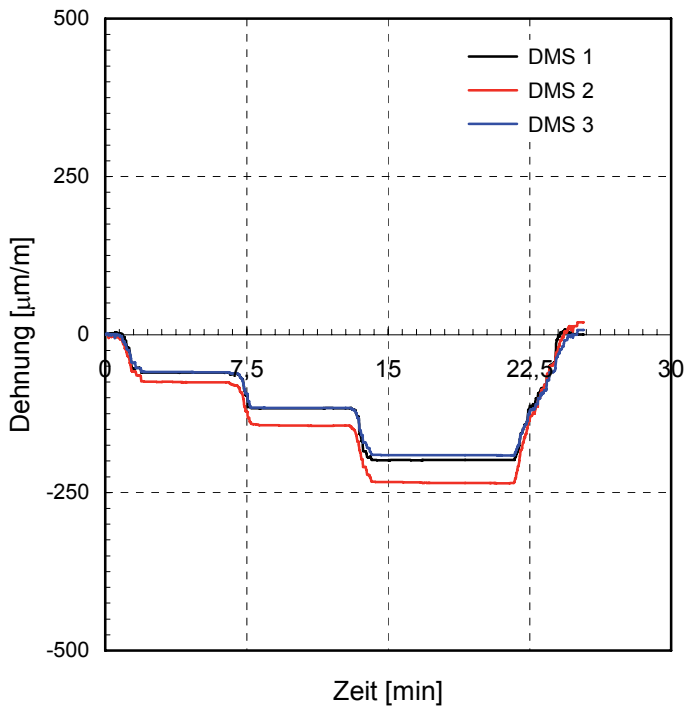


Bild 180 Dehnungswerte am vorderen Punkthalter bei abgehängter Verglasung.

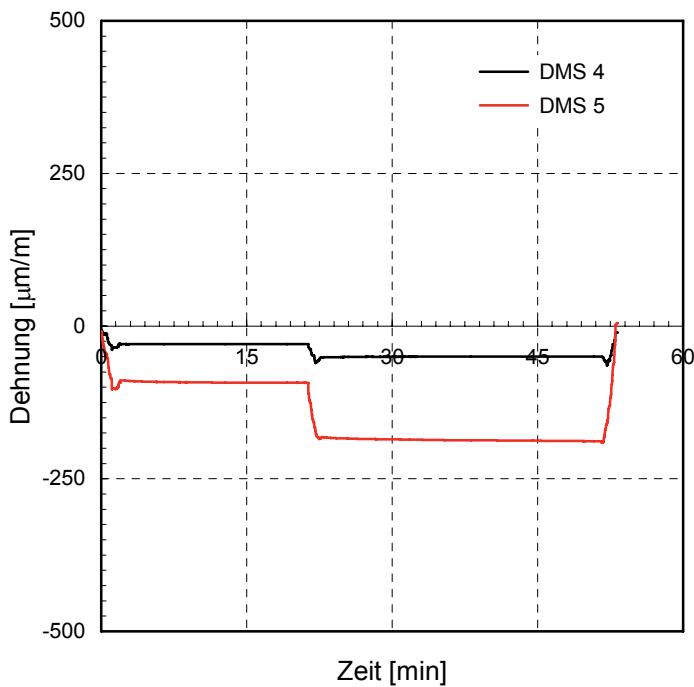
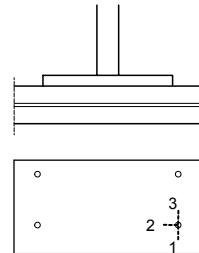
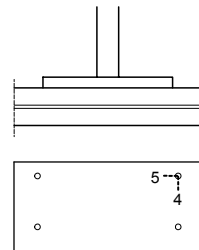


Bild 181 Dehnungswerte am hinteren Punkthalter bei abgehängter Verglasung. Bei dieser Auswertung musste auf eine weitere Messung mit lediglich zweifacher Laststufe ausgewichen und eine andere Einteilung der Zeitachse gewählt werden.



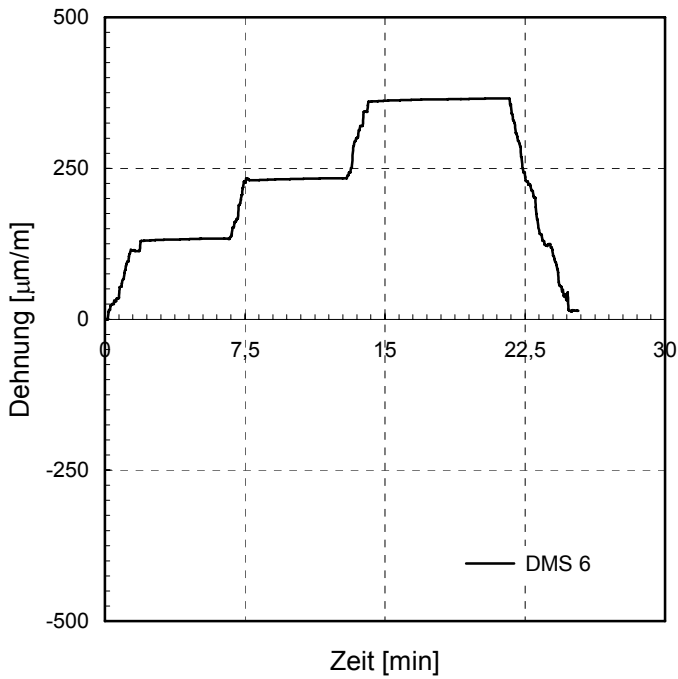


Bild 182 Dehnungswerte in Scheibenmitte bei abgehängter Verglasung. Der Dehnmessstreifen parallel zur kurzen Seite lieferte keine aussagekräftigen Ergebnisse.

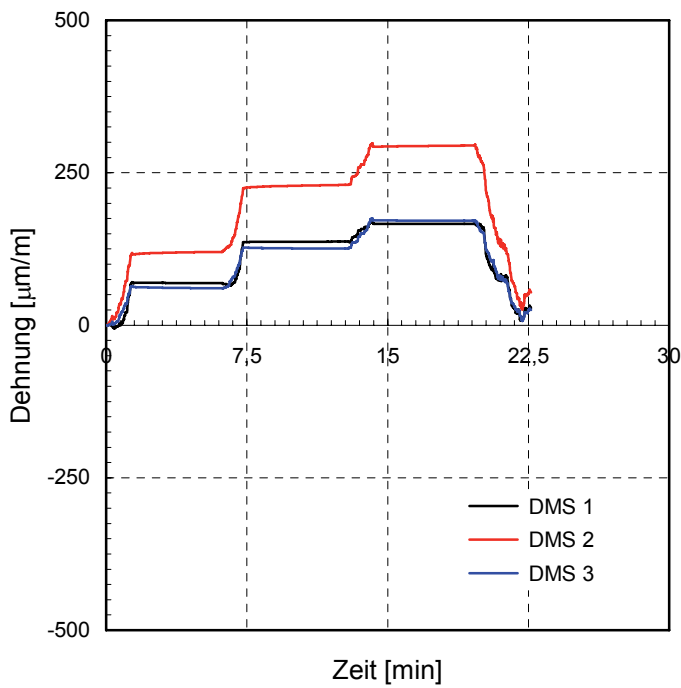
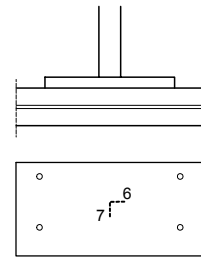
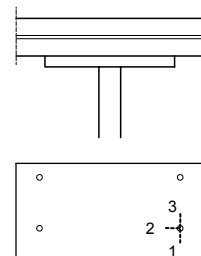


Bild 183 Dehnungswerte am vorderen Punkthalter bei aufliegender Verglasung.



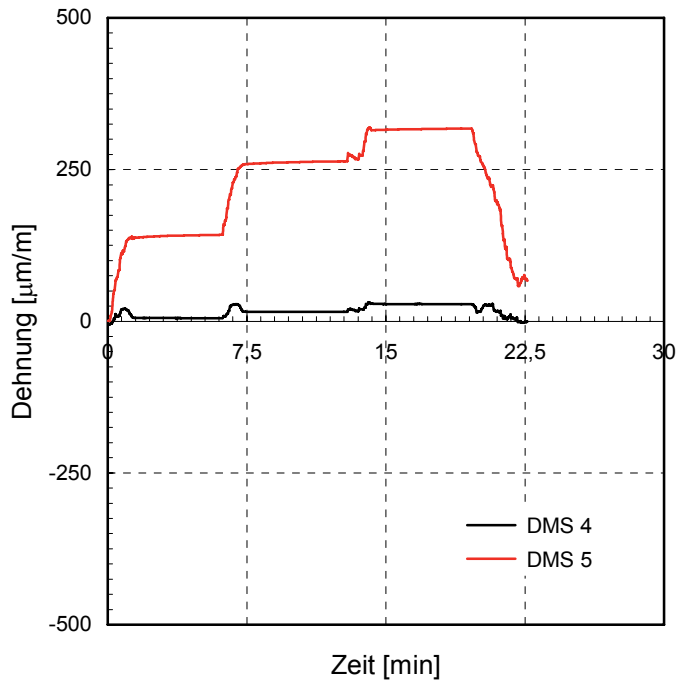


Bild 184 Dehnungswerte am hinteren Punkthalter bei aufliegender Verglasung. Entsprechend der Spannrichtung wurden hohe Dehnungen parallel der langen Seite gemessen.

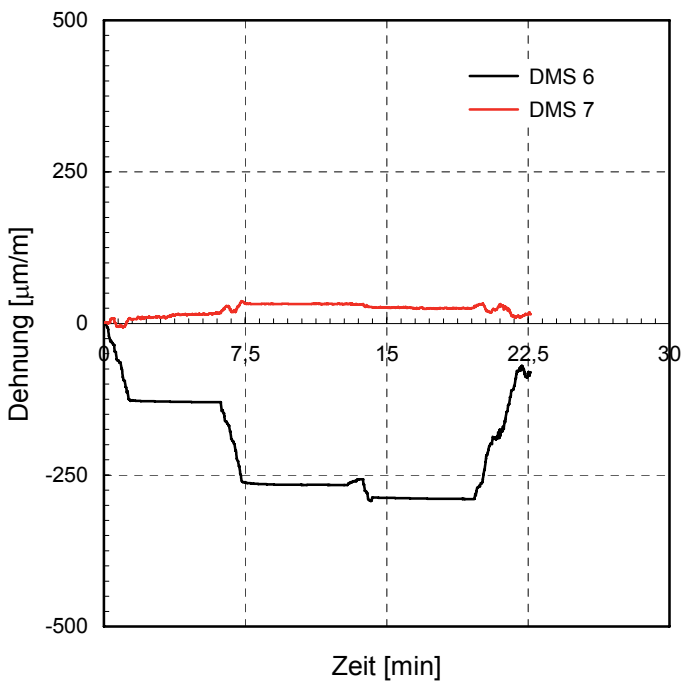
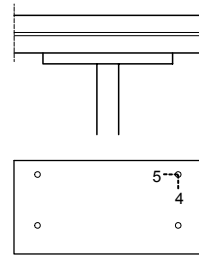
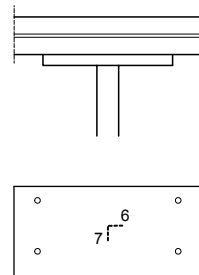


Bild 185 Dehnungswerte in Scheibenmitte bei aufliegender Verglasung. Entsprechend der Spannrichtung wurden hohe Dehnungen parallel der langen Seite gemessen, senkrecht dazu geringe Dehnungen mit umgekehrtem Vorzeichen. Die Ergebnisse resultieren aus einer ungleichmäßigen Verteilung der Lasten.



11.2.7 Freibewitterung

Die verbleibenden zwei geklebten Überkopfverglasungen wurden im Freien aufgebaut. Entsprechend der Planung wurden die Glasscheiben hängend beziehungsweise aufliegend gelagert. Die Klebfugen werden in regelmäßigen Abständen visuell auf Veränderungen untersucht.

Bei der abgehängten Überkopfverglasung erfahren die Klebfugen eine dauerhafte Belastung durch das Eigengewicht. Auf die oberhalb der Glasscheibe liegenden Klebfugen kann die Feuchtigkeit durch Niederschlag oder Schnee über den Rand einwirken.

Die aufliegende Überkopfverglasung ist konstruktionsbedingt vor direkter Einwirkung von Feuchtigkeit geschützt. Die Belastung des Klebstoffes durch UV-Strahlung wird durch die PVB-Folie auf einen sehr geringen Anteil reduziert, da diese nahezu vollständig die Strahlung absorbiert.



Bild 186 Überkopfverglasung in der Freibewitterung. Im Vordergrund befindet sich die abgehängte Verglasung, dahinter die aufliegende Überkopfverglasung.

Bei der aufliegenden Überkopfverglasung zeigten sich auffällige Entwicklungen. Im Laufe einer kurzen Zeitspanne von 8 Wochen bei sommerlichen Temperaturen entstanden deutliche Veränderungen in allen Klebfugen. Eine Schädigung durch UV-Strahlung kann ausgeschlossen werden, da die PVB-Folie nahezu keine Strahlung durchlässt. Auch wiesen die kleinteiligen Zylinderzug- und Druckscherprüfkörper, die längere Zeit in dem Freibewitterungsstand lagerten, kei-

ne Veränderungen in der Klebfuge durch klimatische Einwirkungen auf.¹⁸³

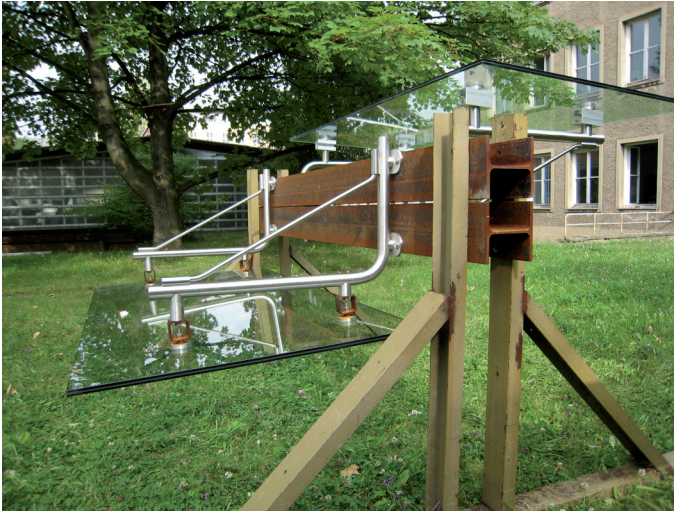


Bild 187 Die im Freien lagernden Überkopfverglasungen sind der Witterung ausgesetzt. An ihnen kann die Beständigkeit gegenüber natürlichen Witterungseinflüssen beurteilt werden.

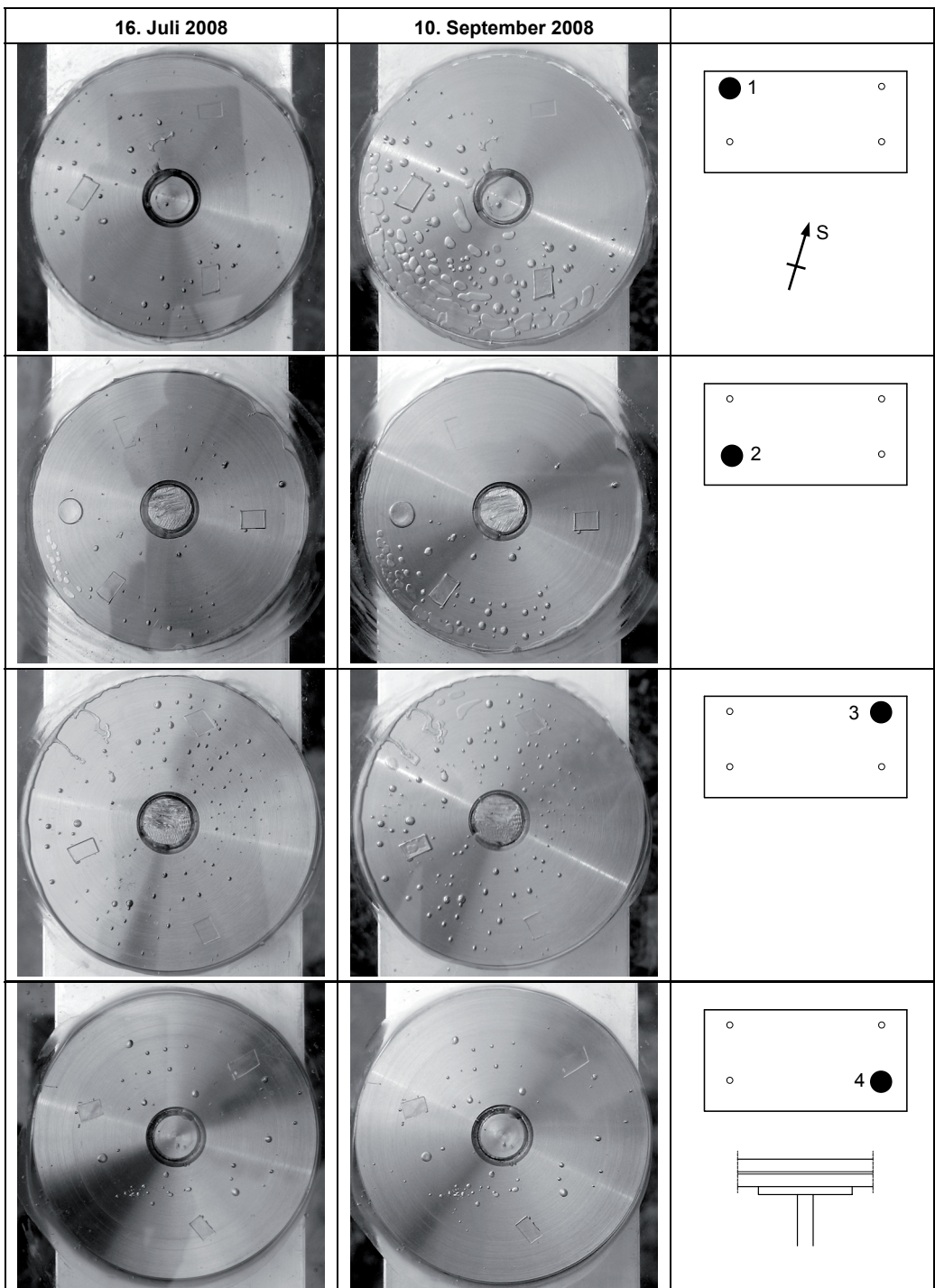
Die Klebfugen der beiden östlich gelegenen Punkthalter 1 und 2¹⁸⁴ zeigten deutliche Veränderungen. Ein Zuwachs an Störungen ist auf der einen Hälfte zu verzeichnen, während sich kleinere Luftbläschen auf der anderen Seite abgebaut haben. Vom Erscheinungsbild weichen die entstandenen Luftblasen von denjenigen ab, die bei der Herstellung entstanden. Sie scheinen flacher und an der Oberfläche des Klebstoffes liegend zu sein. Dies deutet auf Delaminationserscheinungen hin. Jedoch konnte nicht festgestellt werden, ob diese den Verbund zum Glas oder zum Metall betreffen. Ferner sind bei einigen Kunststoffeinslagen, die als Abstandhalter benutzt wurden, gleichartige Erscheinungen sichtbar.

Am Punkthalter 3 zeigen sich ebenfalls Vergrößerungen der Lufteinschlüsse und Ablöseerscheinungen. Die Klebfuge des Punkthalters 4 dagegen weist kaum Veränderungen auf.

Bei der abgehängten Überkopfverglasung sind geringe, aber dennoch vorhandene Veränderungen sichtbar. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt.

¹⁸³ Zum leichteren Beschreiben wurden die Punkthalter durchnummeriert, vergleiche hierzu Kapitel 9.7.

¹⁸⁴ Vergleiche Bild auf nächster Seite.



Tafel 25 Veränderungen in den Klebfugen der aufgeklebten Überkopfverglasung. In der Mitte der Klebfuge ist der Gewindestab zu sehen.

Als Ursache für die Veränderungen in der Klebfuge kommt die mangelnde Verschieblichkeit der Punkthalter in Frage. Alle vier punktförmigen Halterungen sind über Gewindestangen und Montageprofile an der Unterkonstruktion befestigt. Die Glasscheibe ist über eine dünne Klebfuge verbunden. Die Verformungsmöglichkeiten sind gering. Auf Grund der unterschiedlichen Ausdehnungen der Materialien durch Temperatur entstehen daraus Zwängungen in der Konstruktion, die Schädigungen an der Klebfuge hervorrufen.

Aufbauend aus dieser Erfahrung werden weitere Systeme dieser Art mit einer statisch bestimmten Lagerung in Scheibenebene ausgeführt. Entsprechend den Empfehlungen für punktgehaltene Verglasungen werden ein Festlager und ein horizontal verschiebliches Loslager am oberen Scheibenrand angeordnet.¹⁸⁵ Die weiteren punktförmigen Verbindungen werden als Loslager ausgebildet. Eine verschiebliche Lagerung in Scheibenebene kann beispielsweise durch Langlöcher in der Unterkonstruktion oder durch Einsatz von Materialien mit geringen Reibwiderständen erreicht werden. Diese ermöglicht eine zwängungsfreie Lagerung der Konstruktion in Scheibenebene.

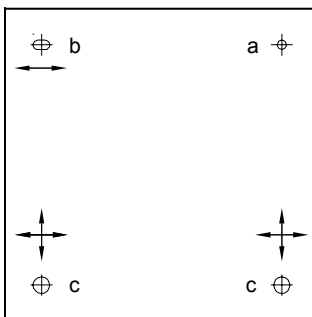


Bild 188 Statisch bestimmte Lagerung in Scheibenebene mittels Fest- und Loslagern.

- a Festlager
- b Vertikallager mit Verschiebungsmöglichkeit in horizontaler Richtung
- c Loslager mit Verschiebungsmöglichkeit in beide Achsrichtungen

¹⁸⁵ Vergleiche hierzu Weller 2008, Seite 66 f. und Wörner 2001, Seite 84 ff.

12 Bauteilversuche - Berechnung

12.1 Absturzsicherung

12.1.1 Modellierung der schmalen Scheibe

Um das komplexe System der an vier Stellen gehaltenen Absturzsicherung zu erfassen, wurde für die Berechnung der Glasscheibe das Finite-Elemente-Programm ANSYS® verwendet. Es wird dabei in dieser Arbeit ausschließlich die Beanspruchung durch die statische Last betrachtet. Die Betrachtung der dynamischen Belastung durch den Pendelschlag soll nicht Gegenstand dieser Arbeit sein.

Das System, bestehend aus Glasscheibe, Klebschicht und Edelstahlhalter, wurde mit Volumenelementen modelliert. Aufgrund der Symmetrie des Systems in beiden Richtungen konnte die Modellierung auf ein Viertel reduziert werden. Für die Klebschicht aus dem Acrylat Photobond 4468 wurden die Materialkennwerte angesetzt, die an der Rohrprobe ermittelt wurden.¹⁸⁶ Dabei wurde ein lineares Materialverhalten angenommen, dass sich bei der Kennwertermittlung im ausgeprägten Anfangsbereich zeigt. Die Klebfuge wurde aus Solid185 Elementen aufgebaut, um auch für weitere Klebstoffe mit unterschiedlichen Materialgesetzen abwandelbar zu sein. Die Voreinstellung des Elementtyps sah bei der Berechnung eine volle Integration vor. Dies führt zu Locking, die Biegung der Platten werden blockiert. Um diesen Effekt zu vermeiden, wird über einen Zusatzbefehl eine enhanced strain Formulierung eingestellt.¹⁸⁷

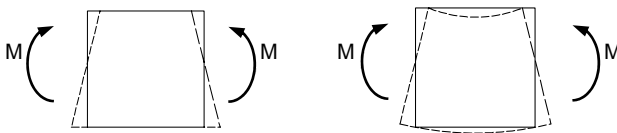


Bild 189 Elementtyp 185. Die Biegung ist blockiert (links) beziehungsweise eine enhanced strain Formulierung eingestellt (rechts).

Senkrecht auf die Glasscheibe wurde eine gleichmäßige Flächenlast von $0,0018 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Diese resultierte aus dem Eigengewicht der liegenden Scheibe und den

¹⁸⁶ Vergleiche dazu Kapitel 8.

¹⁸⁷ Vergleiche dazu CADFEM 2005.

Windkräften, die auf eine Absturzsicherung im Außenbereich wirken können.¹⁸⁸

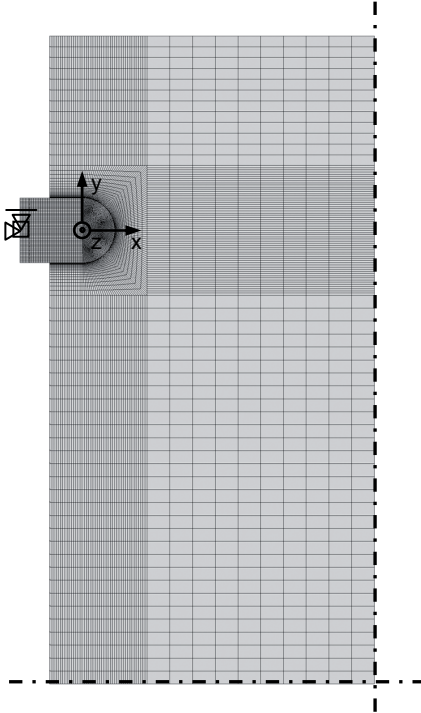
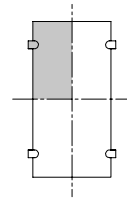


Bild 190 System der schmalen Scheibe. Die Symmetrieeigenschaften wurden ausgenutzt, um die Modellierung auf ein Viertel der Scheibe zu reduzieren. Die Lagerung erfolgte am unteren Punkt des Schraubenlochs des Halters. In y- und z-Richtung ist die Scheibe unverschieblich gelagert.



Zur Reduzierung der Elementanzahl wird der an den Stahlträger angeschlossene Winkel des Edelstahlhalters lediglich bis zur Unterkante des Schraubenlochs modelliert; der weiter oben liegende Teil hat keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Die Lagerung des Systems erfolgte punktuell am Schraubenloch, hierbei wurde ein Knoten als Auflager gewählt. Im Bauteilversuch erhielten die Stahlträger, an denen die Halter über Innengewinde angeschraubt waren, keine zusätzliche Stabilisierung in der Lage. Somit war eine, wenn auch minimale, Kippbewegung über den Rand des Quadratrohrprofils beziehungsweise über die Ecke der Kopfplatte möglich.¹⁸⁹ Im FE-Modell wurde das Auflager infolgedessen in diese Richtung, in x-Richtung, als verschieblich ansetzt.

¹⁸⁸ Flächenlast $1,5 \text{ kN/m}^2$ zuzüglich Eigengewicht der Scheibe mit $0,012 \times 25 = 0,30 \text{ kN/m}^2$. Vergleiche dazu Kapitel 11.1.4.

¹⁸⁹ Vergleiche dazu Abschnitt 11.1.4, Bild 154.

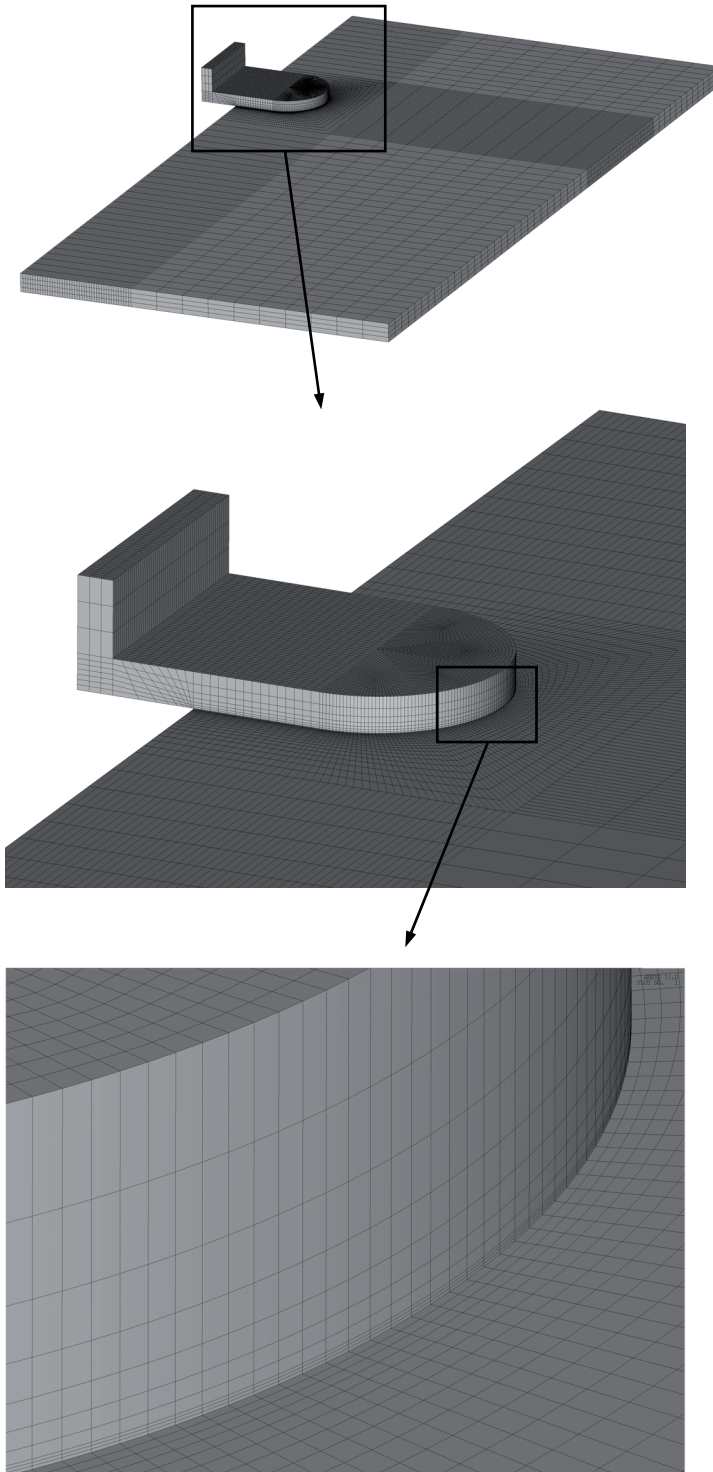
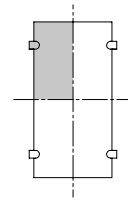


Bild 191 Dreidimensionale Modellierung der schmalen Glasscheibe. Die obere Abbildung zeigt das FE-Netz mit Glasscheibe, Klebschicht und Halter. In der mittigen Abbildung ist der Ausschnitt des abgerundeten Halter mit dem Übergang zu den rechtwinkligen Elementen der Glasscheibe zu erkennen. Die untere Abbildung zeigt vergrößert den Übergang zwischen Halter und Scheibe, wobei die dazwischen liegende Klebfuge mit drei Elementen in der Dicke gebildet wurde.



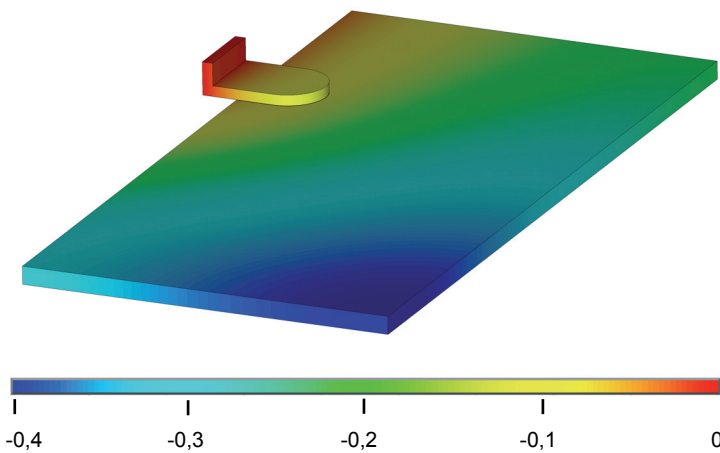
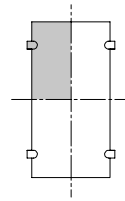


Bild 192 Verformung der schmalen Scheibe in z-Richtung unter Belastung.

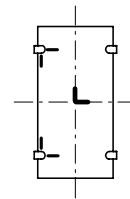


Verformung in [mm]

Die Verformungen in z-Richtung, also in Belastungsrichtung, zeigten das erwartete Bild. Am Auflagerpunkt traten in dieser Richtung keine Verformungen auf. In Scheibenmitte, in dieser Darstellung auf Grund der Symmetrie der untere Eckpunkt, erreichten die Verformungen den maximalen Wert.

Lage der Dehnmessstreifen	Scheibe	Dehnungen in x-Richtung [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Dehnungen in y-Richtung [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Oberer Punkthalter	1	44,3	-69,9
	2	46,7	-74,3
Unterer Punkthalter	1	58,3	-73,1
	2	60,8	-76,6
Mittelwert Punkthalter		52,5	-73,5
Scheibenmitte	1	19,7	21,5
	2	22,6	26,3
Mittelwert		21,2	23,9

Tafel 26 Dehnungen der schmalen Scheibe, gemessen mit Dehnmessstreifen während der Bauteilversuche.

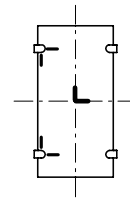


Die Auswertung erfolgte über die Dehnungen, die während der Belastung mit Dehnmessstreifen aufgenommen wurden. Da die Belastung durch die Sandsäcke eine gleichförmige Flächenlast simulieren sollte und die Punkthalter und Dehnmessstreifen spiegelbildlich zur Symmetrieachse angeordnet waren, wurden die Dehnungswerte an den beiden Punkthaltern sowohl für die x- als auch für die y-Richtung und für beide Scheiben gemittelt. Die Dehnung in Scheibenmitte wurde

mit einem biaxialen Dehnmessstreifen sowohl in x- als auch in y-Richtung gemessen. Da die Berechnung mit der Bemessungslast durchgeführt wurde, erfolgte der Vergleich mit den Dehnungswerten der ersten Laststufe des statischen Tragfähigkeitsnachweises.¹⁹⁰

Dehnungen	Punkthalter in x- Richtung [$\mu\text{m/m}$]	Punkthalter in y- Richtung [$\mu\text{m/m}$]	Mitte in x- Richtung [$\mu\text{m/m}$]	Mitte in y- Richtung [$\mu\text{m/m}$]
Versuch	52,5	-73,5	21,2	23,9
Berechnung	44,5	-74,7	24,5	23,9
Abweichung	18 %	1,6 %	15,6 %	0 %

Tafel 27 Vergleich der Dehnungen aus Versuch und Berechnung.



An zwei Stellen, am Punkthalter und in der Scheibenmitte in y-Richtung, zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Dehnungswerten. Die Abweichungen an den beiden anderen Stellen in x-Richtung fielen dagegen deutlich höher aus. Dafür kommen mehrere Aspekte in Frage. In den Bauteilversuchen wurde die Belastung mit Sandsäcken aufgebracht. Obwohl angestrebt, konnte eine gleichmäßige Verteilung der Gewichte nicht gänzlich erzielt werden und führte daher zu Abweichungen. Weiterhin ist besonders am Punkthalter ein deutlicher Anstieg der Dehnungswerte zu finden. Möglicherweise befand sich die Messstelle mit dem aufgeklebten Dehnmessstreifen nur geringfügig neben der Stelle, an der in der Berechnung die Werte abgelesen wurden und führte so zu Abweichungen. Ein weiterer Ansatzpunkt für eine künftige Weiterentwicklung des Modells ist die genauere Simulation des Auflagers mit dem Einfluss der Reibung zwischen dem Halter und dem Rahmenprofil.

Für einen ersten Ansatz der Berechnung einer geklebten Absturzsicherung auf Grundlage der gemessenen Werte ist eine zufriedenstellende Lösung erzielt worden. Weitere Bauteilversuche mit genauer positionierten Dehnmessstreifen und mit einer tatsächlich gleichmäßigen Lastverteilung sollen den Ausgangspunkt bilden, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

¹⁹⁰ Vergleiche dazu Kapitel 11.1.6.

Bei Betrachtung der Klebfuge fällt die Konzentration der Zugspannungen links unten auf. Über den gesamten mittleren Bereich der Fläche wechseln sich Druck- und Zugspannungen geringeren Wertes ab. Am rechten Klebfugenrand treten Druckspannungen auf.

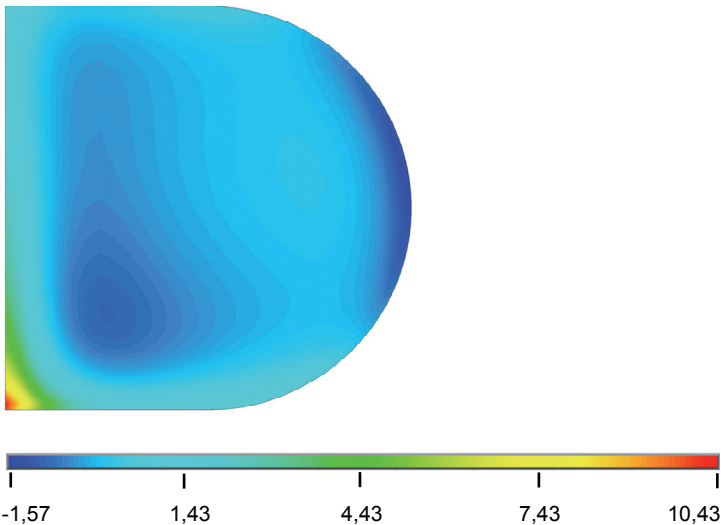


Bild 193 Spannung senkrecht zur Klebfläche, in z -Richtung. Dargestellt sind die Spannungen auf der oberen Klebfugenfläche. Die maximale Zugspannung zeigt sich links unten. Am rechten Rand treten Druckspannungen auf.

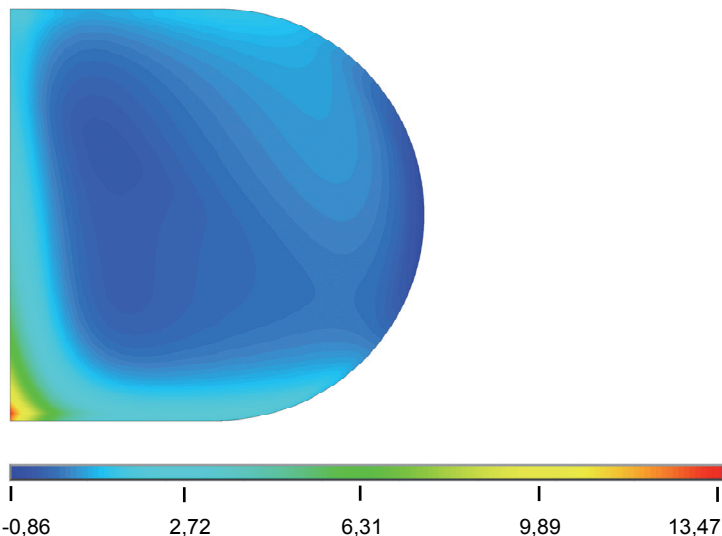


Bild 194 Hauptspannung σ_1 . Es wird von oben auf die Klebfuge geschaut. Die maximalen Zugspannungen treten links unten auf. Auf einem Großteil der Fläche treten niedrige Spannungsbeiträge in einem Wechselspiel zwischen Druck und Zug auf.

Dieses Spannungsbild mag zunächst erstaunlich erscheinen, lässt sich aber über die Verformung des Gesamtsystems erklären. Da das Auflager in x -Richtung eine Verschiebung erfahren konnte, wurde die Klebfuge am Übergang zur Glasscheibe zusammengepresst, sie erfährt eine negative

Dehnung.¹⁹¹ In der y-Richtung ist der Halter unverschieblich gelagert. Durch die vorhandene Verformung der Glasscheibe entstehen in der Klebfuge in diesem Übergangsbereich Zugspannungen.

Bei der Spannungsdarstellung ist zu beachten, dass die Klebfuge mit drei Elementen über die Höhe eingeteilt wurde. Obwohl schon eine recht feine Elemententeilung in der Höhe und über die Fläche gewählt wurde, die die maximale Elementanzahl ausschöpfte, empfiehlt es sich zukünftig eine noch feinere Einteilung zu verwenden, um die Spannungsspitzen an den Rändern genauer darzustellen. Daraus ließe sich ein Versagenskriterium für die Klebfuge aufstellen. Ziel dieser Berechnung war jedoch nicht, die Spannungsspitzen im Detail abzubilden, sondern das Verhalten des Klebstoffes im Groben zu modellieren, um daraus ein Kriterium für weitere Anwendungen aufzustellen.

Eine zusätzlich durchgeführte nichtlineare Berechnung dieses Systems ergab Abweichungen der Dehnungen und Spannungen sowohl in der Glasscheibe als auch in der Klebfuge von nicht mehr als 0,5 % zu den Ergebnissen aus der vorab beschriebenen FE-Modellierung. Somit kann, um die Rechenzeit zu verkürzen, auf diese nichtlineare Berechnung verzichtet werden.

An drei Pfaden durch die Mittelfläche der Klebfuge, also auf der halben Klebfugendicke, wurden die Spannungs- und Dehnungsverteilungen ausgewertet. Pfad 1, in der x-Richtung durch die Klebfuge angeordnet, zeigt den Wechsel zwischen Zug- und Druckspannungen. Am linken Rand treten Zugspannungen auf, die schnell abnehmen und sich in Druckspannungen wandeln. Etwa in der Mitte des Pfades tritt ein erneuter Vorzeichenwechsel auf, bevor am rechten Rand ein weiterer Druckbereich entsteht. Die Dehnungen senkrecht zur Klebfläche zeigen ein vergleichbares Bild. Der zur Scheibenmitte hingewandte Klebfugenbereich erfährt eine Stauchung, am Auflagerbereich links wird die Fuge gedehnt.

¹⁹¹ Eine anschauliche Darstellung mit überhöhter Verformung ist im folgenden Kapitel 12.1.4 zu finden. An einem ebenen System werden die auftretenden Verformungen in der Klebfuge, die die Spannungsverteilung bewirken, veranschaulicht.

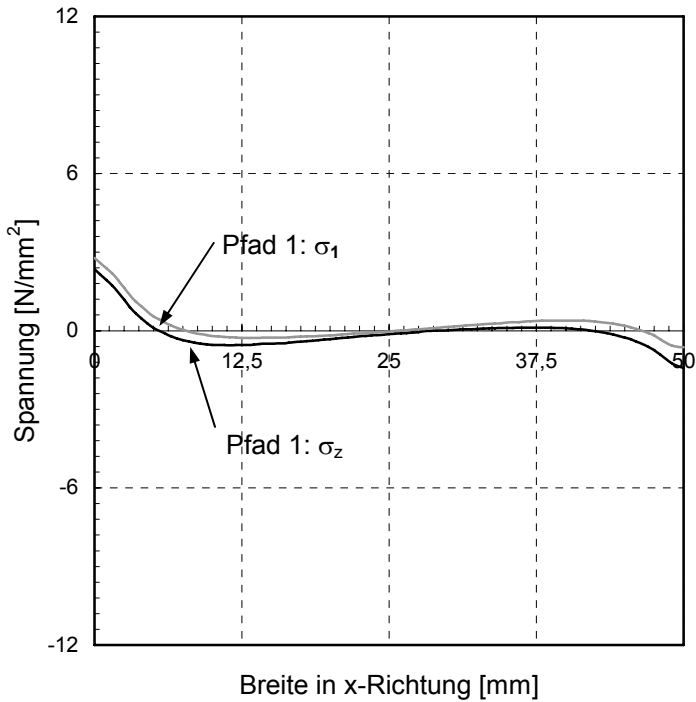


Bild 195 Pfad 1 entlang der x-Achse mittig durch die Klebfuge der schmalen Scheibe. Die Spannungen σ_z und σ_1 zeigen einen Verlauf mit einem dreifachen Vorzeichenwechsel. Die Spannungsspitzen an den Rändern sind durch die Elemententeilung nicht mit ihren exakten Werten dargestellt.

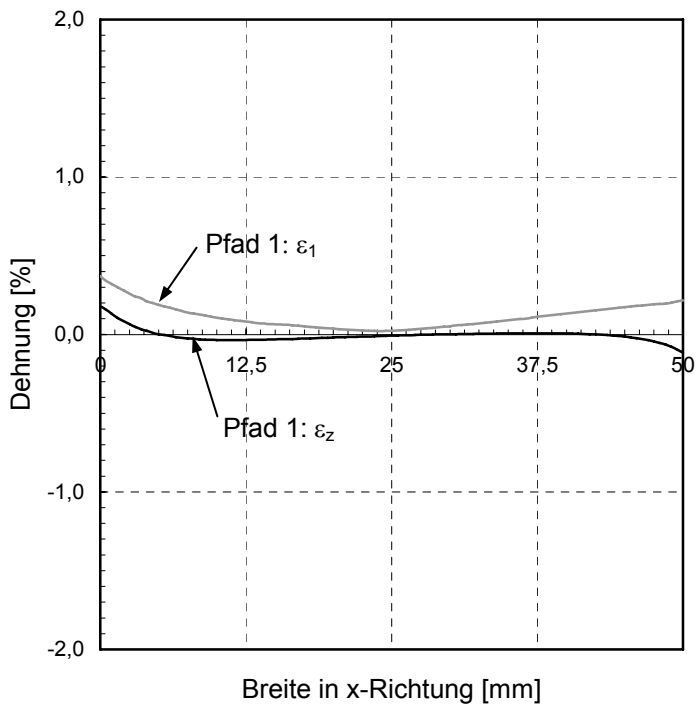
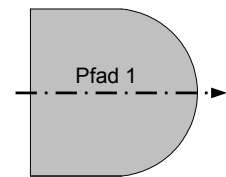
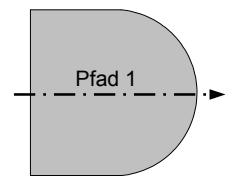


Bild 196 Pfad 1 entlang der x-Achse mittig durch die Klebfuge der schmalen Scheibe. Die Dehnungen ε_z zeigen den ähnlichen Verlauf wie die Spannungen.



In Richtung der y-Achse wurden zwei Pfade angeordnet. Beide verlaufen ebenfalls auf der Mittelfläche der Klebfuge. Pfad 2 beschreibt die Spannungen am äußersten linken Rand. Auf Pfad 3 sind die Spannungen in der Mitte der Klebfugenbreite aufgetragen.

Bei Pfad 2 treten auf der ganzen Länge Zugspannungen auf, wobei die Konzentration am Anfang des Pfades liegt. Die Spannungen sind mit ihren Werten nicht exakt dargestellt, da wegen der Rechenkapazität eine noch feinere Modellierung nicht möglich war. Der linke Punkt dieses Pfades entspricht dem unteren Punkt in der Draufsicht der Klebfläche. Genau an dieser Stelle treten die maximalen Zugspannungen auf, die abklingen und zum oberen Rand hin wieder ansteigen.

Der Pfad 3 verläuft parallel zum Pfad 2, um die Hälfte der Klebbreite in die x-Richtung versetzt. Am unteren Rand treten ebenfalls Zugspannungen auf, die jedoch nicht die Größe der Werte von Pfad 2 erreichen. Sie fallen mit einem Vorzeichenwechsel ab. Bis etwa zur Klebflächenmitte herrschen Druckspannungen vor, nach einem erneuten Vorzeichenwechsel treten Spannungen nahe Null auf. Der Pfad endet mit Zugspannungen.

Die Dehnungen in z-Richtung, also senkrecht zu Klebfläche, weisen entlang des Pfades 2 positive Werte auf. Die Klebfuge wird gedehnt. Die maximalen Werte sind jeweils am Anfang und Ende des Pfades abzulesen.

Entlang des Pfades 3 zeigen die Dehnungen in z-Richtung einen Wechsel zwischen positiven und negativen Werten, wobei nur geringe Stauchungen auftreten.

Insgesamt zeigt sich über die gesamte Klebfuge ein ungleichmäßiger Spannungsverlauf. Zug- und Druckspannungen treten im Wechsel auf. Für den Klebstoff bedeutet dies ein Wechsel von Dehnungen und Stauchungen.

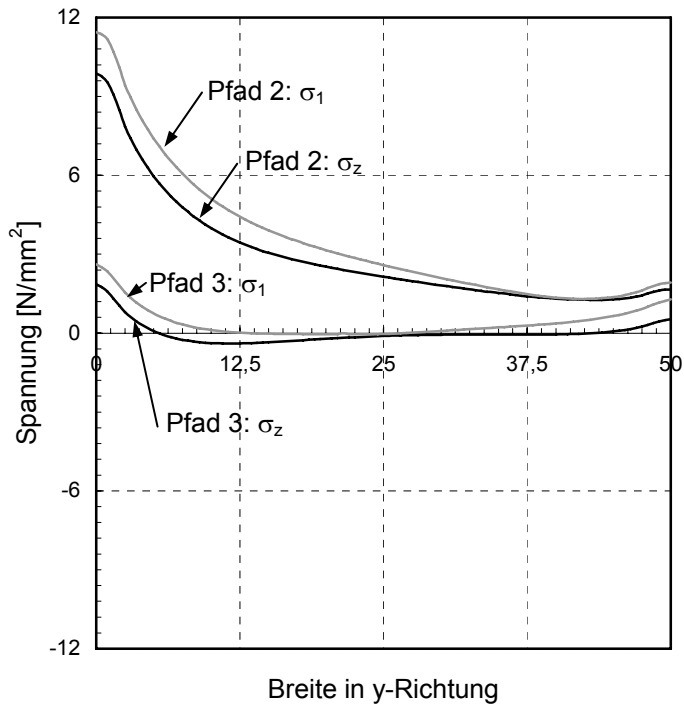


Bild 197 Spannung σ_z und σ_1 am Pfad 2 und 3 entlang der y-Achse mittig durch die Klebfuge.

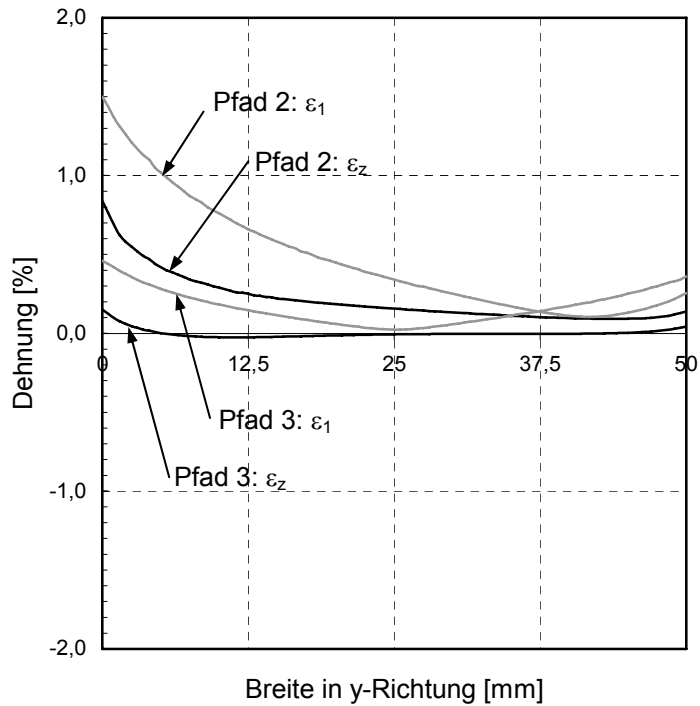
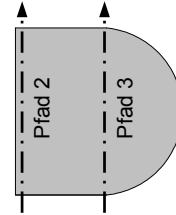
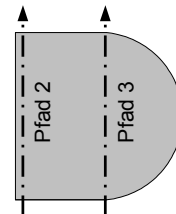


Bild 198 Dehnungen ε_z und ε_1 am Pfad 2 und 3 entlang der y-Achse mittig durch die Klebfuge.



12.1.2 Modellierung der breiten Scheibe

Die Modellierung der breiten Scheibe ist an das FE-System der schmalen Seite angelehnt. Unterschiede ergeben sich lediglich in der Belastung. Es wurde eine gleichmäßig verteilte Flächenlast von $0,0012 \text{ N/mm}^2$ angesetzt. Diese resultiert aus dem Eigengewicht der liegenden Scheibe und der im Anwendungsfall wirkenden Windlast. Dies entsprach der ersten Laststufe im Bauteilversuch.¹⁹² Die Lagerung am Schraubenloch des Halters wurde entsprechend der Modellierung der schmalen Seite umgesetzt.

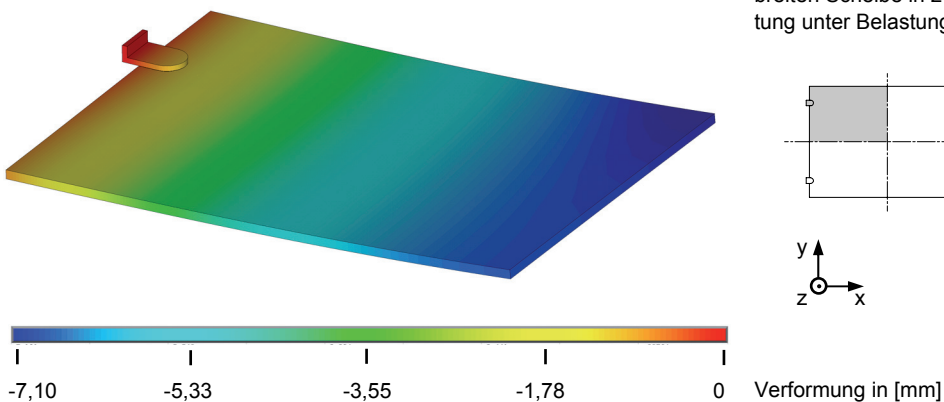
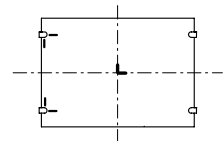


Bild 199 Verformung der breiten Scheibe in z-Richtung unter Belastung.

Das Verformungsbild zeigt konstante Werte parallel zur kürzeren Seite. Zur Scheibenmitte hin steigen die Durchbiegungen bis auf ihren Maximalwert an. Im Vergleich zur schmalen Scheibe ist die veränderte Spannrichtung zu erkennen.

Lage der Dehnmessstreifen	Scheibe	Dehnungen in x-Richtung [$\mu\text{m/m}$]	Dehnungen in y-Richtung [$\mu\text{m/m}$]
Oberer Punkthalter	1	98,7	-110,9
Unterer Punkthalter	1	120,9	-107,4
Mittelwert Punkthalter		109,8	-109,2
Scheibenmitte	1	178,9	-23,1

Tafel 28 Dehnungen der breiten Scheibe, gemessen mit Dehnmessstreifen während der Bauteilversuche.

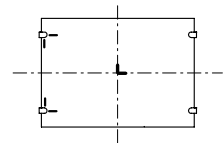


¹⁹² Vergleiche dazu Kapitel 11.1.4.

Die Dehnungen wurden während der Belastungsphase mit Dehnmessstreifen aufgenommen und für die Auswertung entsprechend der Richtungen gemittelt. Wie aus der Aufstellung zu sehen, traten besonders zwischen den Dehnungen in x-Richtung zwischen oberen und unteren Punkthalter größere Abweichungen auf. Dies zeugt von einer ungleichmäßigen Verteilung der Sandsäcke auf der Scheibe.

Dehnungen	Punkthalter in x- Richtung in $[\mu\text{m}/\text{m}]$	Punkthalter in y- Richtung $[\mu\text{m}/\text{m}]$	Mitte in x- Richtung $[\mu\text{m}/\text{m}]$	Mitte in y- Richtung $[\mu\text{m}/\text{m}]$
Versuch	109,8	-109,2	178,9	-23,9
Berechnung	88,1	-109,7	178,0	-13,4
Abweichung	24 %	0,5 %	0,5 %	56 %

Tafel 29 Vergleich der Dehnungen aus Versuch und Berechnung.



Auch bei der breiten Scheibe zeigte sich an zwei Messpunkten eine hervorragende Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den berechneten Werten. Dies waren die Dehnungen am Punkthalter in y-Richtung und in Plattenmitte in x-Richtung. An den beiden anderen Stellen, am Punkthalter in x-Richtung und in Plattenmitte in y-Richtung, waren größere Abweichungen zu verzeichnen. Die schon für die schmale Scheibe angeführten Gründe sind hier ebenfalls ursächlich. Die Belastung durch Sandsäcke ergab keine regelmäßig über die gesamte Fläche verteilte Gleichlast. Gleichwohl war es möglich, dass die Dehnmessstreifen nicht exakt an der richtigen Stelle angeordnet waren. Durch die Spannungskonzentrationen konnten geringfügige Lageungenauigkeiten schon bemerkenswerte Abweichungen ergeben. Außerdem wurde die Simulation des Halters einschließlich Verschraubung und Reibung an der Rückseite vereinfacht dargestellt. Hier sollten weitere Versuche mit verbesserter Versuchsdurchführung und eine anschließend verfeinerte Berechnung folgen.

Die Verteilung der Spannungen zeigt ein ähnliches Bild wie bei der schmalen Scheibe. Links unten konzentrieren sich hohe Zugspannungen, die dann rasch abklingen. Über einen Großteil der Fläche wechseln sich Zug- und Druckspannungen geringen Wertes ab. Die maximalen Druckspannungen befinden sich am gerundeten Rand. Für diese Berechnung wurden lediglich die Spannungen in z-Richtung dargestellt.

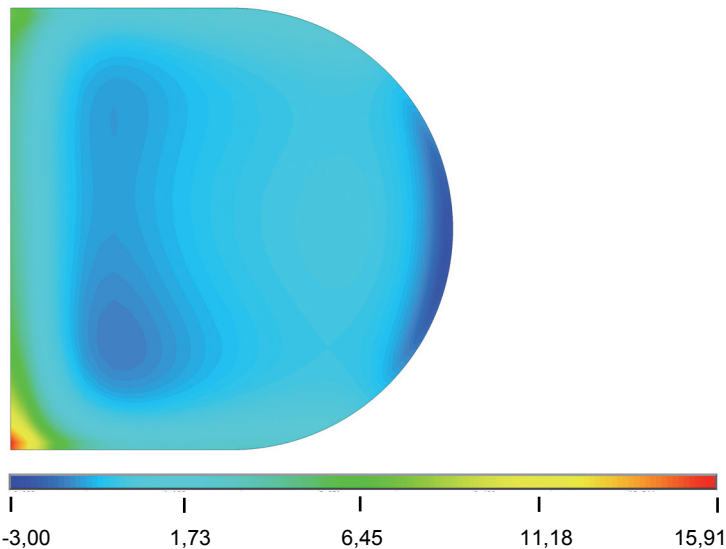


Bild 200 Spannung senkrecht zur Klebfläche in z-Richtung. Die Darstellungsweise zeigt die Spannungen auf der oberen Klebefugenfläche. Zu beachten ist, dass die Farbskala an den auftretenden Spannungsbereich angepasst ist.



Für einen direkten Vergleich wurden an den gleichen drei Pfadverläufen die Spannungen aufgetragen. Auf die Darstellung der Dehnungen wurde verzichtet.

Eine nichtlineare Berechnung ergab Veränderungen in den Spannungen, die die Größenordnung von 1 % nicht überschritten. Somit konnte für weitere Betrachtungen auf diese zeitintensivere Variante verzichtet werden.

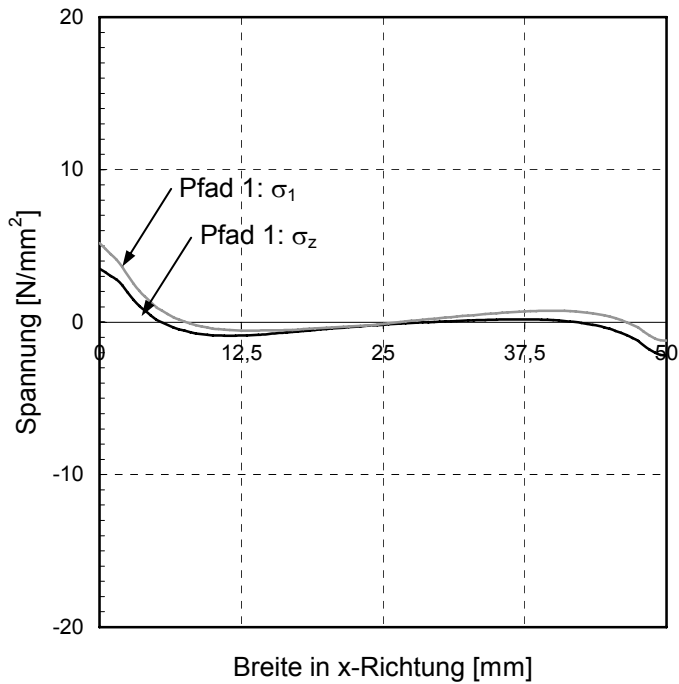


Bild 201 Pfad 1 entlang der x-Achse mittig durch die Klebfuge. Die Spannungen σ_z und σ_1 zeigen einen Verlauf mit einem dreifachen Vorzeichenwechsel. Die Spannungsspitzen an den Rändern sind durch die gewählte Elemententeilung nicht mit ihren exakten Werten dargestellt.

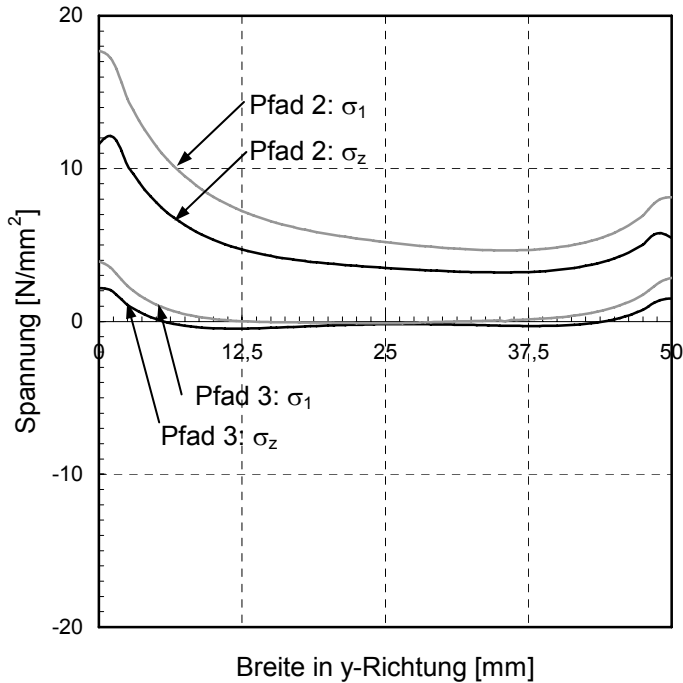
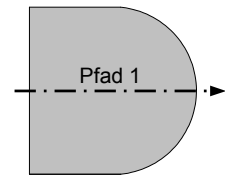
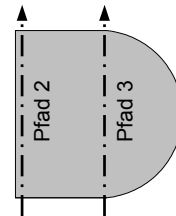


Bild 202 Spannung σ_z und σ_1 an den Pfaden 2 und 3 entlang der y-Achse mittig durch die Klebfuge.



12.1.3 Vergleich beider Systeme

Insgesamt ergab sich bei beiden Scheibentypen ein ähnlicher Spannungsverlauf über die gesamte Klebfläche. Zugspannungen und Druckspannungen wechseln sich ab. Die maximalen Zugspannungen liegen bei beiden Systemen links unten und fallen schnell auf niedrigere Werte ab. Die maximalen Druckspannungen liegen am gerundeten Rand. Bei der breiten Scheibe verschieben sich im oberen Bereich die Zugspannungen entlang des Randes, dafür nehmen die Druckspannungen in der Mitte einen größeren Bereich ein.

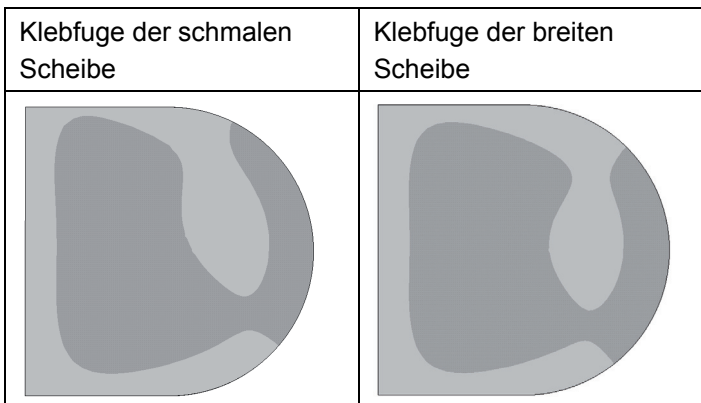




Bild 203 Verteilung der Druck- und Zugspannungen in der Klebfuge.

 Zugspannungen σ_z
 Druckspannungen σ_z

Bei der Modellierung der Bauteilversuche ergab sich für die Klebfuge ein Spannungsbild, das von dem der Kleinteilver-suche abweicht.¹⁹³ Bei diesen Versuchen - im Speziellen der Zylinderzugversuch - traten ausschließlich Zugspannungen auf. Der Wechsel zwischen Druck und Zug und somit zwischen Dehnung und Stauchung wurde in den Kleinteilver-suchen nicht simuliert.

Für eine Beurteilung der Festigkeit von lastabtragenden Klebungen im Glasbau empfiehlt es sich, zusätzlich den Schäl-test heranzuziehen.¹⁹⁴ Hierbei stellt sich in der Klebfuge ein Wechsel zwischen Zug- und Druckspannungen ein.

¹⁹³ Vergleiche Kapitel 10.

¹⁹⁴ Ziel dieser Prüfungen nach EN 1464 und EN 28510-2 ist es, über Schälkräfte, die die Klebverbindung aufreißen lassen, das Adhäsionsvermögen zu beurteilen. Das erzeugte Spannungsbild zeigt Zugspannungen an der Aufreißstelle und Druckspannungen im Anschluss. Vergleiche hierzu Adams 2005 und Habenicht 2006, Seite 428 ff.

12.1.4 Parameterstudie

Wie in der vorangehenden Berechnung ermittelt wurde, wechseln sich Zug- und Druckspannungen innerhalb der Klebfläche ab. Um den Einfluss verschiedener Faktoren auf die Spannungsverteilung in der Klebfuge abzuwägen, wird eine Parameterstudie anhand eines zweidimensionalen Ersatzmodells durchgeführt. Ziel dieser Variantenuntersuchung ist es, die Konstruktion und die Geometrie der Halterung zu verbessern und durch einen gleichmäßigen Spannungsverlauf die Tragfähigkeit der Klebverbindung zu steigern.¹⁹⁵

Vereinfacht wird das System der Absturzsicherung an einem Schnitt durch Halter, Klebfuge und Glasscheibe als ebenes Modell dargestellt. Als Grundlage für die Studie wird die schmale Glasscheibe betrachtet. Wie in den vorangehenden Kapiteln wird für diese Betrachtung ein lineares Materialgesetz angenommen, das sich aus dem Anfangsbereich der durchgeführten Versuche ergab. Ausgehend von dem Grundsystem mit den vorhandenen Materialien und Abmessungen wird die Klebfuge in Breite und Höhe und mit Elastizitätsmodul variiert. Für die Fügeteile Glas und Metall werden unterschiedliche Dicken angesetzt. Weiterhin wird das Auflager verschoben.

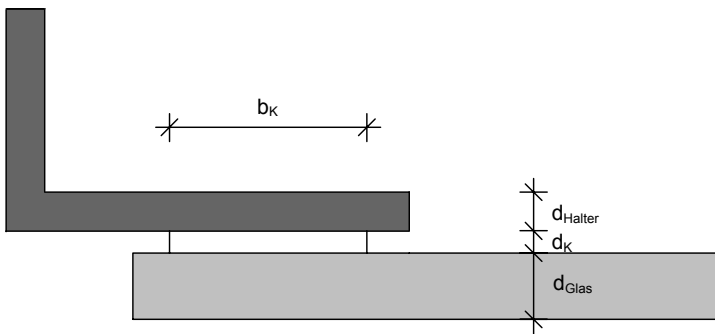


Bild 204 Zweidimensionales System der Absturzsicherung für die Parameterstudie. Dafür werden die Dicke, die Breite der Klebfuge, der Elastizitätsmodul des Klebstoffs, die Dicke der Fügeteile und die Lage des Auflagers variiert.

¹⁹⁵ Vergleichbar ist dies mit dem Prinzip des elastisch gebetteten Balkens, dessen Verformung und Spannungsverteilung von einer Reihe von Faktoren abhängen, wie der Steifigkeit und Geometrie der einzelnen Komponenten und dem Bettungsmodul des Bodens. Vergleiche hierzu Hahn 1985, Seite 243 ff. und Wölfer 1978.

	Variable			Grundsystem	Variationen
Klebstoff	Breite	b_K	[mm]	50	30 / 20 / 10
	Dicke	d_K	[mm]	0,2	0,5 / 1,0
	Elastizitätsmodul	E_K	[N/mm ²]	349	4 / 2348
Halter	Dicke	d_{Halter}	[mm]	7	3,5 / 14 / 70
Scheibe	Dicke	d_{Glas}	[mm]	12	6 / 25
Auflager	Lage			Schraubenloch	mittig über Klebfuge

Tafel 30 Parameter für die Variantenuntersuchung. Insgesamt werden fünf die Fügepartner betreffende Variablen betrachtet und mit dem Grundsystem verglichen. Zusätzlich wird die Lage des Auflagers verändert. Als Grundsystem wird das ausgeführte System der Absturzsicherung bezeichnet. Hierbei werden die variierten Werte als wirkliche oder als fiktive Werte mit einem Vielfachen oder einem Bruchteil der Ausgangsgröße angesetzt.

Alle Variantenuntersuchungen erfolgen im direkten Vergleich zum Grundsystem, um somit die unmittelbare Auswirkung der einzelnen Parameter zu erfahren. In den nachfolgenden Diagrammen ist die Kurve des Grundsystems in schwarz gehalten, während die anderen in grau dargestellt sind.

Entsprechend der Berechnung des dreidimensionalen Systems der Absturzsicherung erfolgt die Lagerung am Schraubenloch des Halters. Die geringfügige, aber dennoch vorhandene Bewegungsmöglichkeit des Halters in Plattenrichtung durch Kippen des Trägers über seine vordere Kante wird weiterhin beibehalten. Um unmittelbar den Einfluss der Geometrie und der Steifigkeiten der Verbindungselemente auf das Spannungsbild in der Klebfuge einschätzen zu können, wird eine fiktive Belastung q gleichmäßig verteilt auf die Glasscheibe angesetzt. Die Belastung variiert mit der Breite der Klebfuge und ergibt auf die Klebfläche bezogen einen konstanten Wert.

Die Belastung und somit die Spannungen geben nicht die real auftretenden Werte wieder, sondern sind nur als An-

haltswerte zu verstehen, um die Auswirkungen der einzelnen Komponenten zu vergleichen.

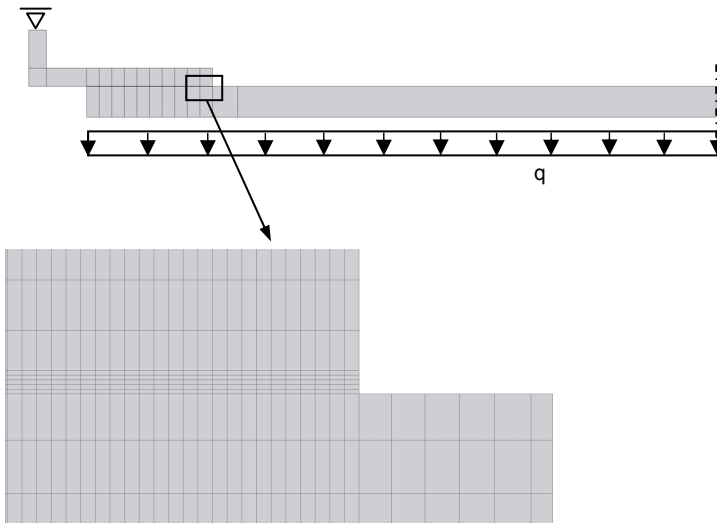


Bild 205 Zweidimensionales System - hier das Grundsystem - unter Ausnutzung der Symmetrieeigenschaften in Scheibenmitte. Die Belastung wird in Abhängigkeit der Klebfugenbreite angesetzt. Somit ergibt sich auf die Klebfläche eine konstante Belastung. Im oberen Bild ist das gesamte System mit der Einteilung in Flächen dargestellt. Der Ausschnitt unten zeigt die Elementeneinteilung am Übergang Glas zu Metall. Die dazwischen liegende Klebfuge ist mit fünf Elementen in der Höhe abgebildet.

Betrachtet man das Verformungsbild, erkennt man das für dieses System typische Deformationsverhalten der Klebfuge. Durch die Lagerungsart des Halters und das Verformungsverhalten der Glasscheibe wird die Klebfuge zur Feldmitte hin zusammengedrückt, an diesem Rand entstehen Druckspannungen. Am Rand, der zur Halterung zeigt, wird die Klebfuge gedehnt, es entstehen Zugspannungen.

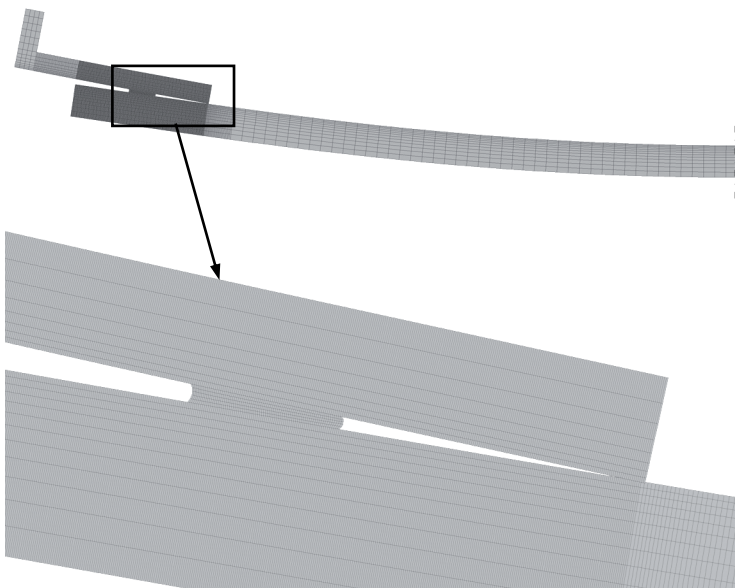


Bild 206 Verformtes System unter Belastung. Zur anschaulichen Darstellung wird das System mit einer auf 10 mm reduzierten Klebfugenbreite in 25-facher Vergrößerung der Verformungen gezeigt. Zur Feldmitte hin wird die Klebfuge gestaucht, die andere Seite wird auseinandergezogen. Durch die feinmaschige Elementeneinteilung im Bereich der Klebfuge mit angrenzendem Halter und Glas erscheint dieser Bereich in der oberen Darstellung dunkler als der restliche Bereich.

Die Gegenüberstellung der Spannungen für die verschiedenen Varianten erfolgt entlang der Mittellinie der Klebfuge. Im vorhandenen System mit einer Klebfuge über die gesamte Breite von 50 mm ruft die Belastung einen Spannungsverlauf hervor, der von einem mehrfachen Wechsel zwischen Zug- und Druckspannungen geprägt ist. An beiden Rändern treten hohe Spannungen auf, die dann mit einem Vorzeichenwechsel abfallen. Etwa in Klebfugenmitte erfolgt ein erneuter Wechsel der Spannungswerte. Bei geringer werdender Breite der Klebfuge, verringern sich die Spannungstäler. Bei einer Reduktion auf 40 % der ursprünglichen Klebfugenbreite, also auf 20 mm, weist diese außer dem nahezu mittigen Vorzeichenwechsel keinen weiteren mehr auf. Bei einer Verringerung auf 20 % der Breite, also auf 10 mm, ist ein nahezu geradliniger Verlauf zwischen maximalen Zug- und Druckspannungen festzustellen, der steigende Werte der maximalen Spannungen verursacht.

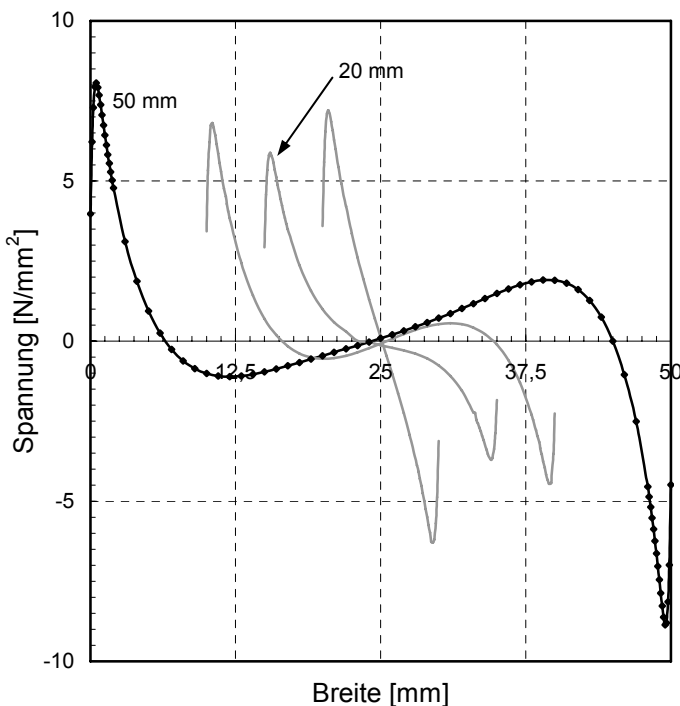
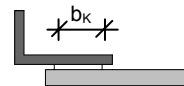


Bild 207 Variation der Klebfugenbreite, Spannungen in Abhängigkeit der Klebfugenbreiten 50/30/20/10 mm. Die Spannungen des Grundsystems (schwarze Kurve) sind mit den einzelnen Ablesepunkten gekennzeichnet, die im Bereich der Ränder in geringeren Intervallen notiert wurden. Bei allen weiteren Kurven wird zugunsten der Übersichtlichkeit auf diese Darstellungsweise verzichtet. Die Werte der Spannungen stellen nur fiktive Werte dar, die einen direkten Vergleich zwischen den Varianten ermöglichen.



Bei Klebfugen mit größeren Dicken sind die Spannungsspitzen und die Spannungstäler in ihrer Ausprägung abgeschwächt. Das Grundsystem mit der ausgeführten Klebfugendicke von 0,2 mm ist einem System mit einer Fugendicke von 1,0 mm gegenübergestellt. Grundlage des Vergleichs ist der Ansatz gleichbleibender Materialkennwerte für den Klebstoff im ausgehärteten Zustand.

Schon bei einer Klebfugenbreite von 60 % der Ursprungsbreite, das entspricht einer Breite von 30 mm erfolgt der Vorzeichenwechsel bei der dickeren Klebfuge ungefähr in der Mitte. Das Spannungstal, das bei der dünnen Klebfugendicke beidseitig des Mittelpunktes erscheint, ist nahezu eingeebnet. Im Vergleich dazu wird dieser Zustand bei einer Klebfugendicke von 0,2 mm erst bei einer Breite von 20 mm erzielt. Bei den dickeren Klebfugen ist bei allen Kurven ein geringerer Anstieg der Spannungen an den Rändern zu verzeichnen.

Als Ergebnis aus diesem Vergleich wird bei Belastung senkrecht zur Klebfläche eine dickere Klebfugenausbildung empfohlen. Dadurch werden die Spannungsspitzen abgemindert und der Spannungsverlauf nimmt gleichmäßigere Züge an.

Bei der Variation des Elastizitätsmoduls des Klebstoffes wurden die Werte angesetzt, die anhand der Rohrprobe für Temperaturen von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermittelt wurden. Bei höherem Elastizitätsmodul des Klebstoffes, also einem steiferen Klebstoff - dafür wird der Wert für $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ angesetzt - erscheinen hohe Spannungsspitzen an den Rändern, die Täler verschieben sich zum Rand hin mit geringfügig zunehmenden Werten. Bei niedrigerem Elastizitätsmodul, also bei einem weicheren Klebstoff - hier mit dem Wert für eine Temperatur von $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ gerechnet - ist ein deutlich gleichförmigerer Verlauf in den Spannungen zu erkennen. Es sind sowohl die Spannungsspitzen an den Rändern abgemindert, als auch die Spannungstäler innerhalb der Klebfuge nahezu abgebaut.

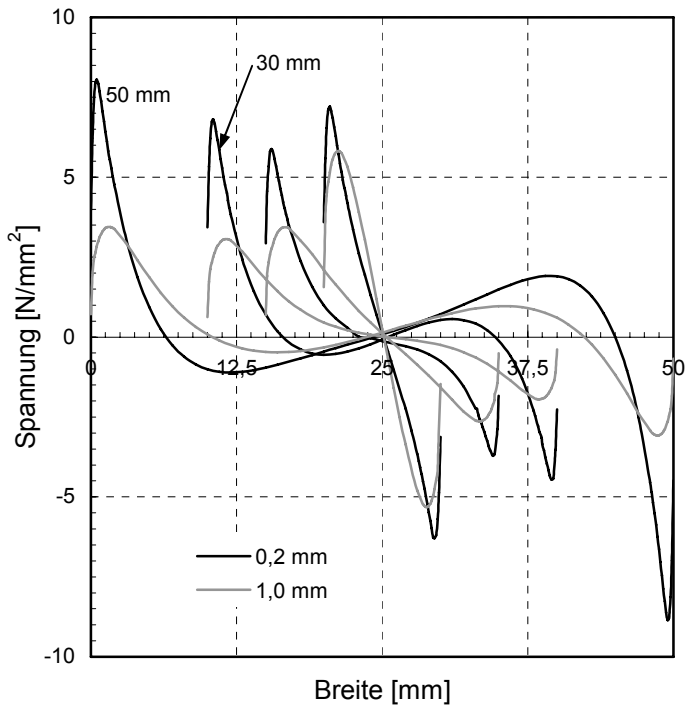


Bild 208 Variation der Klebfugendicke, Spannungen in Abhängigkeit von der Klebfugendicke 0,2 mm (schwarz) beziehungsweise 1,0 mm (grau) und der Klebfugenbreite 50/30/20/10mm. Je dicker die Klebfuge, umso geringer fallen die Spannungsspitzen und -täler aus.

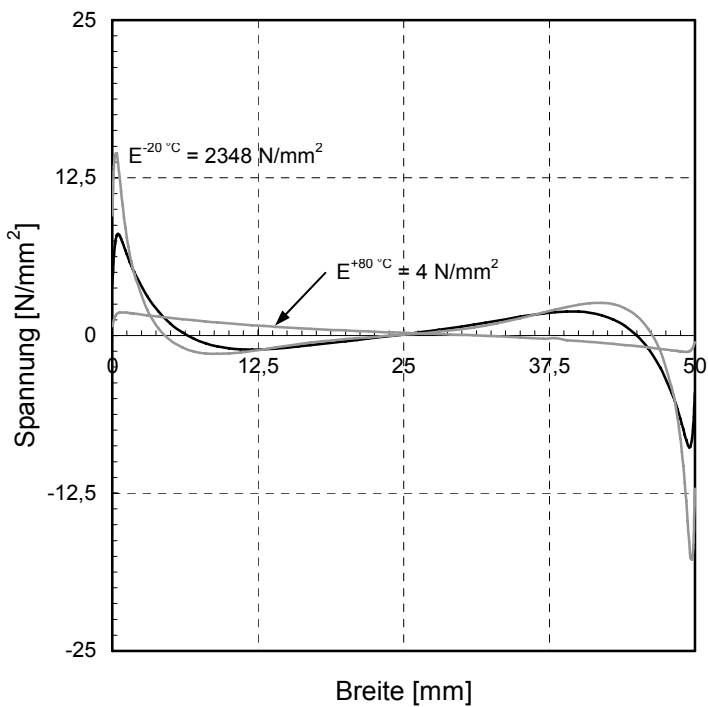
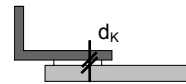
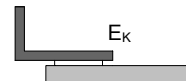


Bild 209 Variation des Elastizitätsmoduls der Klebfuge. Spannungen in Abhängigkeit der Werte für Raumtemperatur, -20 °C und +80 °C. Bei der vorangegangenen Kennwertermittlung ergaben sich Werte von 349/4/2348 N/mm². Je geringer der Wert des Elastizitätsmoduls, umso gleichmäßiger sind die auftretenden Spannungen.



Der Halter wurde für diese Parameterstudie in seiner Dicke variiert. Zusätzlich zu den vorhandenen Abmessungen erfolgte die Untersuchung mit drei weiteren Dicken. Dabei wurde die ursprüngliche Dicke von 7 mm um den Faktor 2 reduziert beziehungsweise erhöht. Zusätzlich wurde ein fiktiver Halter mit der 10-fachen Dicke betrachtet.

Der Spannungsverlauf in der Klebfuge bei dünner Halterplatte ist von deutlich höheren Spannungsspitzen am linken Rand geprägt. Im Anschluss fallen die Spannungen steil in den negativen Bereich ab. Dickere Fügeteile ergeben im linken Bereich einen gleichmäßigeren Spannungsverlauf mit niedrigeren lokalen Maximalwerten.¹⁹⁶ Der Spannungsverlauf im auflagerabgewandten Bereich weist dagegen geringere Maximalwerte bei dünneren und somit nachgiebigeren Fügeteilen auf. Vorwiegend wird der Spannungsanstieg am rechten Rand der Klebfuge durch die Verformung der Glasscheibe bestimmt.

Darüber hinaus wurde die Glasscheibe einer Variation der Dicke unterworfen. Die vorhandene Scheibendicke von 12 mm wurde für die Parameterstudie halbiert und nahezu verdoppelt.¹⁹⁷ Im linken Bereich der Klebfuge ergeben sich bei Variation der Scheibendicke lediglich geringfügige Unterschiede in der Ausbildung der Spannungsspitzen und der Spannungstäler. Im rechten Bereich hingegen werden die Einflüsse offensichtlich. Dünne Scheibendicken, die Glasscheibe wird im Feld stärker durchgebogen, rufen einen Spannungsverlauf mit deutlichen Maximalwerten hervor. Je dicker die Glasscheibe, umso geringer ist die Durchbiegung in Scheibenmitte und umso gleichmäßiger verlaufen die Spannungen im rechten Bereich der Klebfuge.

¹⁹⁶ Vergleiche hierzu die Ergebnisse der Parameterstudie für einen idealisierten Punkthalter in Schadow 2006, Seite 83 f. In einem numerischen Vergleich für verschiedene Klebstoffe wurde ein Punkthalter sowohl einer Zug- als auch einer Schubbeanspruchung unterworfen. Die Spannungen wurden in Abhängigkeit variierender Durchmesser und Blechdicken der Punkthalter ermittelt. Um eine günstige Spannungsverteilung zu erzielen, wurde ein kompakter Punkthalter empfohlen, der mit einem kleineren Durchmesser entsprechend eine kleinere Klebfläche besitzt. Für die Blechdicke wurde auch hier eine dickere Ausführung als günstig nachgewiesen.

¹⁹⁷ ESG ist in Glasstärken von 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19, 25 mm lieferbar, vergleiche hierzu Weller 2005, Seite 5.51.

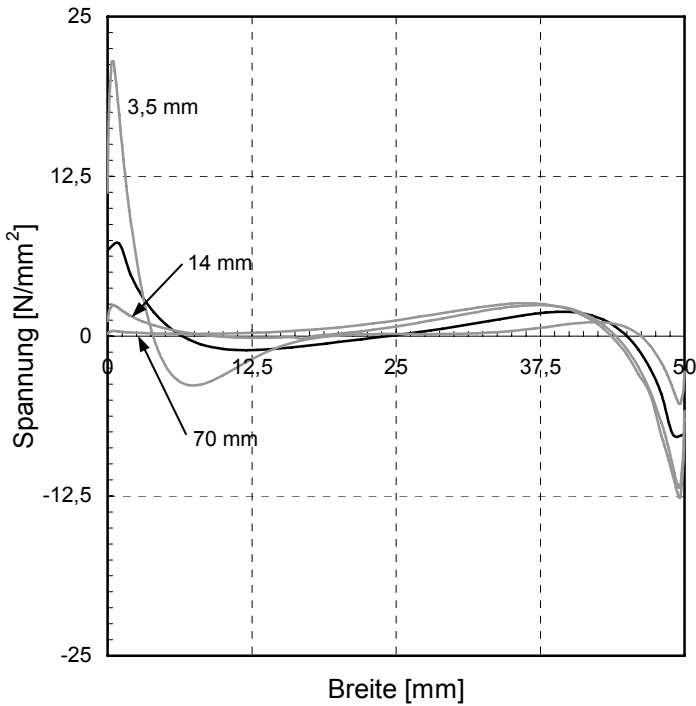


Bild 210 Variation der Dicke des Edelstahlhalters. Untersucht wurden Abmessungen von 3,5/7/14 und 70 mm. Dickere Fügeteile bewirken im linken Bereich einen gleichmäßigeren Spannungsverlauf, während rechts ansteigende Spannungsspitzen zu verzeichnen sind. Der Spannungsanstieg rechts ist hauptsächlich durch die Verformung der Glasscheibe bedingt.

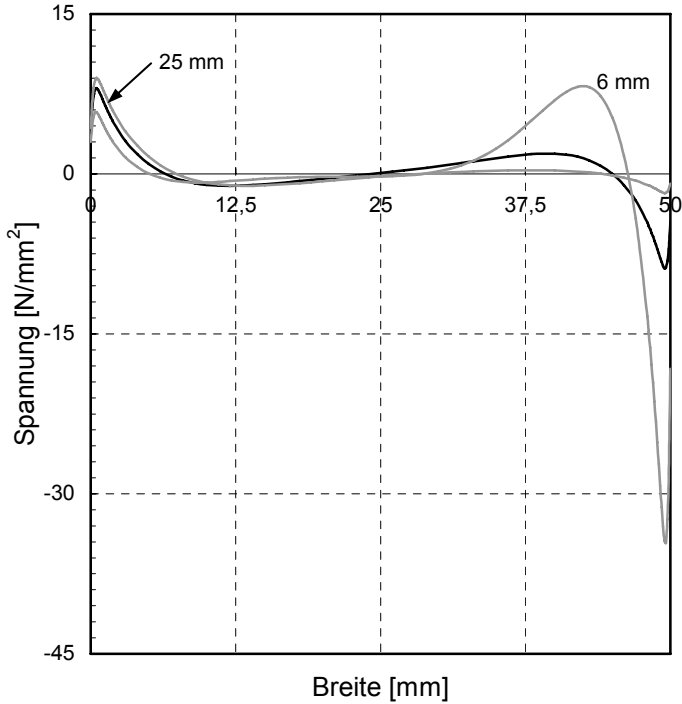
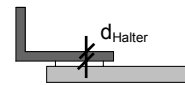
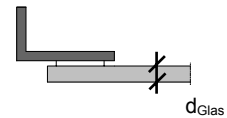


Bild 211 Variation der Dicke der Glasscheibe. Untersucht wurden Abmessungen von 6/12/25 mm. Dünne Glasscheiben bewirken am rechten Rand der Klebfuge durch ihre Verformbarkeit hohe Spannungsspitzen. Je dicker das Fügeteil, umso gleichmäßiger ist der Spannungsverlauf. Der Spannungsverlauf in der linken Hälfte wird in erster Linie durch den Halter aus Edelstahl beeinflusst.



Auffallend bei den Betrachtungen ist der nahezu punktsymmetrische Spannungsverlauf. Bedingt ist dies durch die Anordnung der Lagerung in Bezug auf die Klebfuge. Durch diese Exzentrizität entsteht in der Klebfuge ein Moment, welches in ein Kräftepaar aufgespalten wird und Spannungsspitzen mit entgegengesetzten Vorzeichen ergibt.

Verschiebt man die Lagerung mittig über die Klebfuge, dann reduzieren sich die Spannungsspitzen durch eine Verminderung der Exzentrizität deutlich. Es ergibt sich ein eher gleichförmiger Spannungsverlauf.

Bei dieser Betrachtung verdeutlicht sich die Wichtigkeit, der Anordnung des Auflagers eine besondere Beachtung zu schenken. Dadurch kann ein beanspruchungsgerechtes Konstruieren im besonderen Maße beeinflusst werden. Durch eine günstige Lage des Auflagers in Bezug zur Klebfläche können die Spannungen in dem Klebstoff um ein Vielfaches reduziert werden.

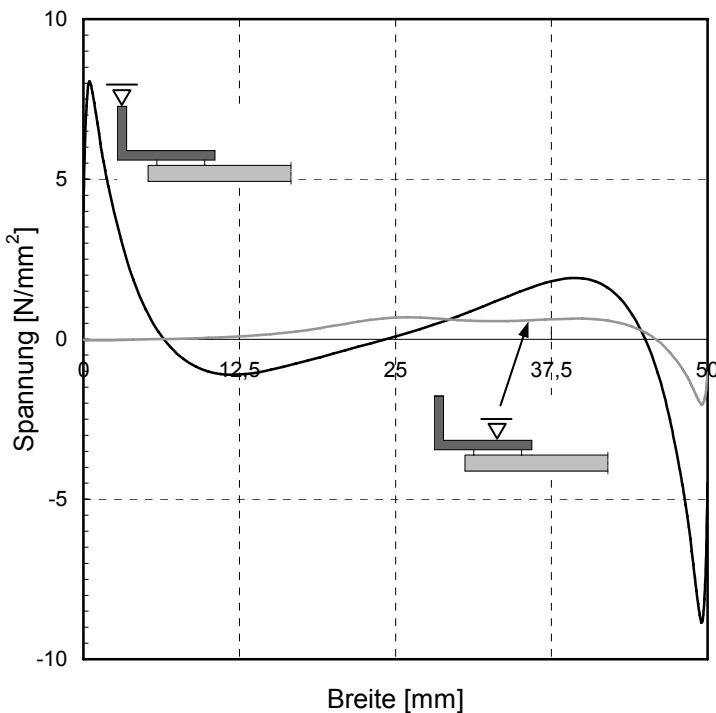


Bild 212 Verschiebung des Auflagers. Erfolgt die Auflagerung mittig über der Klebfuge, entsteht ein gleichförmigerer Spannungsverlauf. Hier verdeutlicht sich die Anforderung, der Anordnung des Auflagers besondere Beachtung zu schenken. Dadurch kann ein beanspruchungsgerechtes Konstruieren im besonderen Maße beeinflusst werden.

12.1.5 Hinweise und Schlussfolgerung

Geklebte Konstruktionen sollten nach Möglichkeit vorab einer rechnerischen Untersuchung mit Variationen von Klebschicht- und Füge Teileigenschaften unterworfen werden. Auch wenn die Geometrie der Füge Teile durch Kriterien der Konstruktion und der Tragfähigkeit festgelegt wurde, ist es dennoch zweckmäßig, die Klebfuge in Dicke und Breite anzupassen.

Bei der in dieser Arbeit untersuchten Konstruktion mit Kräften, die hauptsächlich senkrecht zur Klebfläche wirken, empfiehlt es sich, diese nicht zu groß zu wählen. Dadurch kann ein Spannungsverlauf mit mehrfachem Vorzeichenwechsel vermieden werden. Ebenfalls erweist es sich als sinnvoll, die Klebfugendicke mit mindestens 0,5 mm, besser 1,0 mm auszuführen. So können die Spannungsspitzen reduziert und ein gleichmäßigerer Spannungsverlauf erzeugt werden.

Sollte die gesamte Konstruktion einschließlich Halterung neu konzipiert werden, wird empfohlen, die Lagerung der Halterplatte mittig über der Klebfuge anzuordnen. Dadurch werden geringere Momente durch einen exzentrischen Lastangriff erzeugt und ein gleichmäßigerer Spannungsverlauf mit deutlich abgemilderten Maximalwerten hervorgerufen.

Aufbauend auf die vorangegangenen Untersuchungen wurde die dreidimensionale Modellierung der schmalen Scheibe mit reduzierten Klebflächen durchgeführt. Dazu wurde die Klebfuge in zwei Bereiche unterteilt, in einen rechteckigen und in einen halbkreisförmigen Teil, und getrennt voneinander für die Berechnung verwendet. Die Fugendicke bleibt vorerst unverändert, um den Einfluss der Fläche begutachten zu können.

Es ist zu erkennen, dass weiterhin sowohl Zug- als auch Druckspannungen in der Klebfuge auftreten. Jedoch sieht das Spannungsbild insgesamt weniger ungleichmäßig aus. Bei der rechteckigen Klebfuge - hier ist die Fläche auf etwa 60 % der Ursprungsfläche reduziert - entstehen maximale Spannungen, die nur geringfügig höher sind als die der vollen Klebfläche. Obwohl die Klebfläche deutlich verkleinert wurde, steigen die rechnerisch ermittelten Spannungen

kaum an. Wird lediglich der halbkreisförmige Bereich als Klebfläche angesetzt, also auf etwa 40 % der Ursprungsfläche reduziert, so erhöhen sich die Spannungsmaxima um etwa 30 %. Jedoch verteilen sich diese auf einen größeren, dem Auflager zugewandten Bereich. Insgesamt lässt sich bei diesen Teilflächen ein ruhigeres Spannungsbild mit weniger Vorzeichenwechseln.

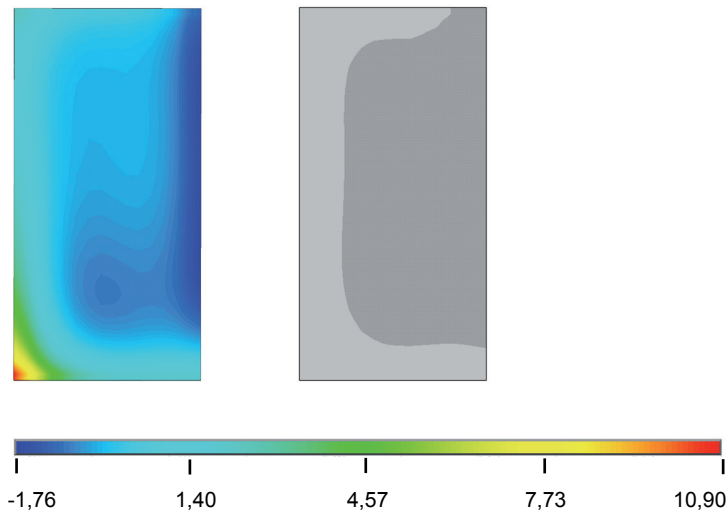
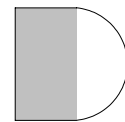


Bild 213 Spannungsverteilung in der Klebfuge der schmalen Scheibe. Die geklebte Fläche wurde auf den rechteckigen Bereich reduziert.



■ Zugspannungen σ_z

■ Druckspannungen σ_z

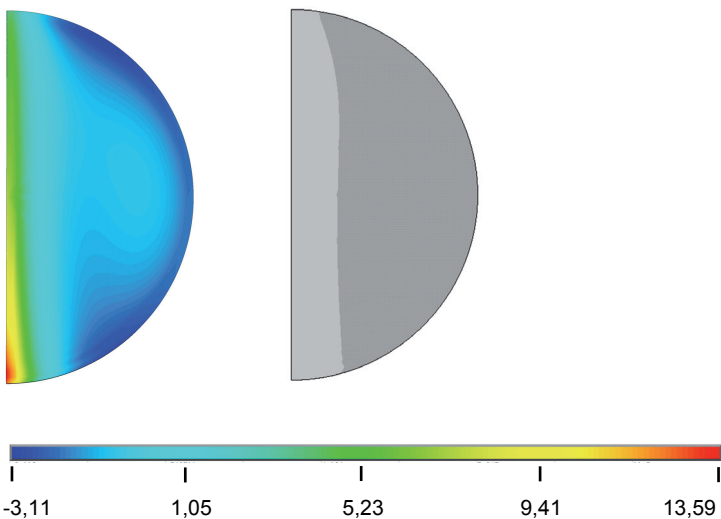
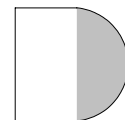


Bild 214 Spannungsverteilung in der Klebfuge für die schmale Scheibe. Die geklebte Fläche wurde auf den halbkreisförmigen Bereich reduziert.



■ Zugspannungen σ_z

■ Druckspannungen σ_z

Die Versuchsergebnisse der Bauteilprüfungen konnten durch die vorgenommene Modellierung zufriedenstellend abgebildet werden. Einige Messwerte konnten mit lediglich geringen Abweichungen nachgerechnet werden. Dagegen erfordern Unterschiede an einigen anderen Stellen weitere Untersuchungen. Eine verfeinerte Modellierung und eine verbesserte Übereinstimmung der herausgegriffenen Messmarken werden dem Ziel dienlich sein. Weiterhin sollte auch im Bauteilversuch eine gleichmäßige Belastung realisiert werden.

12.2 Überkopfverglasung

Ansatzweise wird ebenfalls eine geklebte Überkopfverglasung aus Verbund-Sicherheitsglas rechnerisch erfasst. Betrachtet wird das System mit abgehängter Verglasung, also oben liegenden Halterungen. Die Modellierung und Berechnung wurde mit dem FE-Programm ANSYS® 11.0 durchgeführt. Gemäß DIN 18008-1 darf die günstig wirkende Verbundwirkung weder im Spannungs- noch im Durchbiegungsnachweis angesetzt werden.

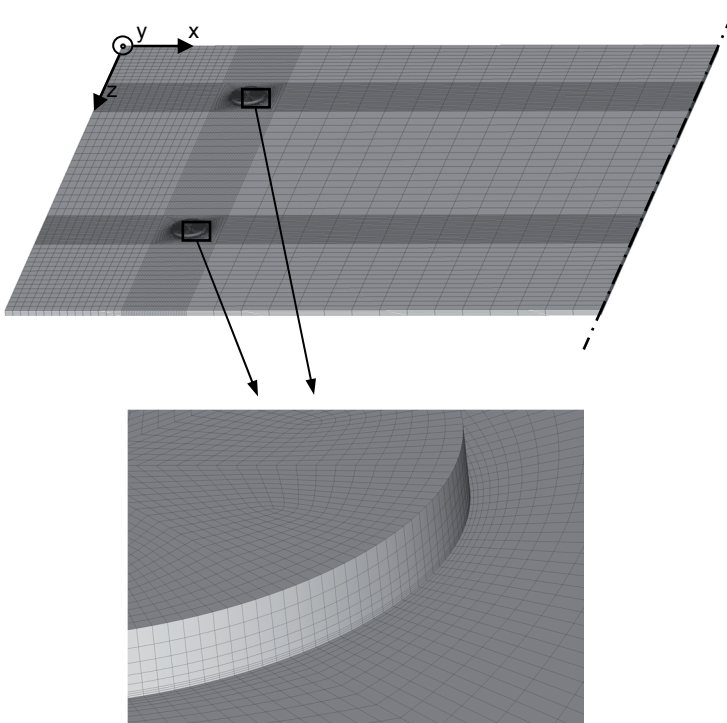
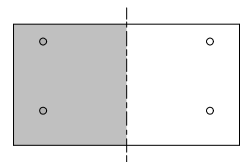


Bild 215 System der Überkopfverglasung mit Einteilung in Elemente. Die Symmetrie in Scheibenmitte wird ausgenutzt, um den Aufwand der Modellierung auf die Hälfte zu reduzieren.



Der untere Ausschnitt zeigt eine Vergrößerung des Übergangs von Halter zu Glasscheibe. Dazwischen liegt die Klebfuge, die mit drei Elementen in der Höhe modelliert wurde.

Die VSG-Scheibe besteht aus zwei gleich dicken Scheiben aus TVG mit einer Dicke von 8 mm und einer dazwischen liegenden PVB-Folie. Da der Schubverbund nicht angesetzt werden darf, wurde die VSG-Scheibe mit ihrer Ersatzdicke¹⁹⁸ modelliert.

$$d^* = \sqrt[3]{\sum_1^n d_i^3} = \sqrt[3]{8^3 + 8^3} = 10,08 \text{ mm}$$

Gleichung 42

mit

d^* Ersatzdicke in [mm]

d_i Dicke der Einzelscheiben in [mm]

Bei Betrachtung der Verformung senkrecht zur Scheibe ergibt sich das erwartete Bild. Die maximalen Durchbiegungen treten mittig an der vorderen Kante auf.

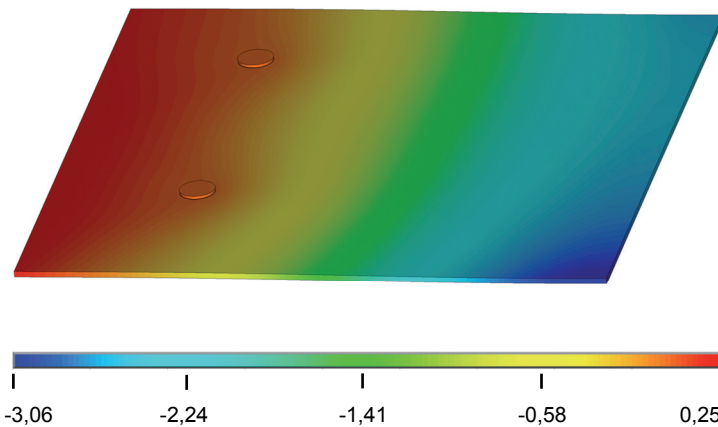
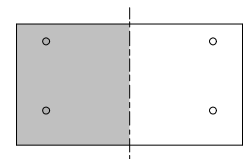


Bild 216 Verformung der Scheibe in y-Richtung unter Belastung.



Verformung in [mm]

Auszugsweise wurde nur der vordere Punkthalter betrachtet. Am hinteren Punkthalter zeigte sich eine ähnliche Spannungsverteilung, wobei die Werte vom Betrag geringfügig niedriger ausfielen.

¹⁹⁸ Die Ersatzdicke gibt die Dicke einer monolithischen Einzelscheibe mit gleicher Biegesteifigkeit wie das Verbund-Sicherheitsglas ohne Verbund wider, vergleiche hierzu Weller 2009, Seite 82 f.

Auch bei diesem System zeigte sich in der Klebfuge keine reine Zugbeanspruchung. Sowohl Zug- als auch Druckspannungen treten in der Klebfuge auf.

Zu bemerken ist, dass durch die Elemententeilung der Klebfuge die Spannungsspitzen möglicherweise ungenau beschrieben wurden. Um eine genaue Abbildung zu erzielen, aus der Rückschlüsse auf das Versagen gezogen werden können, sollte eine verfeinerte Elemententeilung gewählt werden. Da in dieser Arbeit lediglich eine Aussage zu Gestaltungskriterien getroffen wird, wurde zugunsten einer kürzeren Rechenzeit auf diese Verfeinerung verzichtet.

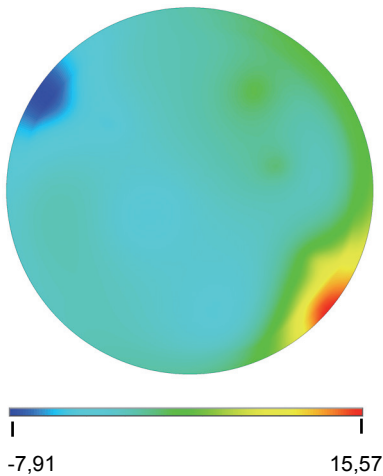
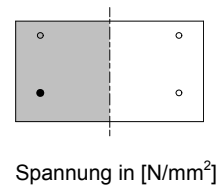


Bild 217 Spannung σ_y in der Klebfläche des vorderen Punkthalters. Die maximalen Zugspannungen sind dem Schnittpunkt von Symmetrieachse und breitem Rand der Glasscheibe zugewandt.



Spannung in [N/mm²]

Wie bei der Absturzsicherung sollten zukünftige Ausführungen von geklebten Überkopfverglasungen auf eine Parameterstudie aufbauen. Durch die Größe der Klebfläche und die Steifigkeit des Klebstoffes können das Spannungsbild und die Größe der Spannungsspitzen beeinflusst werden.

Gleichfalls hat die Ausbildung des Punkthalters und im Besonderen die Lagerung Auswirkung auf die Beanspruchung in der Klebfuge. Umfangreiche Untersuchungen im Rahmen eines anlaufenden Forschungsprojektes sind zu punktförmig geklebten Photovoltaikerelementen geplant. Nach einer ausführlichen Variantenuntersuchung soll ein großflächiger Einsatz dieser Module ermöglicht werden.

13 Acrylate im Konstruktiven Glasbau: Empfehlungen

13.1 Vorbemerkungen

Diese Empfehlungen sind praktische Hinweise zur Planung, Berechnung und Ausführung von strukturellen Klebungen mit UV- und lichthärtenden Acrylaten im Konstruktiven Glasbau. Die nachstehende Zusammenstellung basiert auf den Ergebnissen dieser Arbeit, die frühere Untersuchungen an der Technischen Universität Dresden berücksichtigt.¹⁹⁹

Bisher werden im Konstruktiven Glasbau Klebungen, die Lasten auf die Unterkonstruktion übertragen, in der Regel mit Silikonklebstoffen hergestellt. Die hier untersuchten strahlungshärtenden Acrylate unterscheiden sich deutlich von den bekannten Silikonklebstoffen in der Zusammensetzung, in der Aushärtung und den erreichbaren Festigkeiten. Bei der Planung von Klebverbindungen mit Acrylaten müssen die Eigenschaften des Materials und die dadurch bedingten Erfordernisse an die Konstruktion beachtet werden.

Klebstoffe werden fortlaufend weiterentwickelt. Modifizierungen verbessern die Leistungsfähigkeit bei besonderen Anforderungen. Dennoch bleibt das grundsätzliche Materialverhalten der strahlungshärtenden Acrylate erhalten. Werden andere Acrylate verwendet, sollte ein Vergleich der Datenblätter erfolgen. In Ergänzung sind die technischen Informationen der Hersteller zu beachten.²⁰⁰

13.2 Eigenschaften der Klebstoffe

13.2.1 Transparenz

Die hier untersuchten Acrylate sind volltransparent und mit dem bloßen Auge kaum wahrnehmbar. Klebungen mit UV- und lichthärtenden Acrylaten erhöhen deshalb die transparente Wirkung von Glaskonstruktionen. Im Unterschied zu Silikonklebstoffen werden Acrylate bei deutlich höheren Festigkeiten mit geringeren Fugendicken ausgeführt. Zum Aus-

¹⁹⁹ Vergleiche hierzu Tasche 2007.

²⁰⁰ Die technischen Informationen der Hersteller enthalten zum Teil ausführliche praktische Hinweise für Klebstoffanwender. Vergleiche zum Beispiel DELO 2008.

gleich möglicher Toleranzen der Fügeteile sollten Fugendicken $< 0,5$ mm nicht ausgeführt werden. Die Verbindungsflächen der Klebfugen können aufgrund der höheren Festigkeiten minimiert werden. Entsprechend schlanker können Lagerungen und Verbindungselemente geplant werden.

13.2.2 Temperaturbeständigkeit

Strahlungshärtende Acrylate sind vorzugsweise im Innenbereich einzusetzen. Da sie ein temperaturempfindliches Verhalten aufweisen, dürfen die Klebverbindungen keinen großen und längerfristigen Temperaturschwankungen ausgesetzt werden. Sowohl das reine Klebstoffmaterial als auch Klebungen in der Verbindung zeigen ein sehr unterschiedliches Verhalten bei verschiedenen Temperaturen.

Für Konstruktionen im Außenbereich, zum Beispiel Vertikal- oder Überkopfverglasungen, sind angelehnt an die Europäische Richtlinie ETAG 002-1 Temperaturen von -20 °C bis $+80$ °C zu beachten. Die Glasübergangstemperatur der Acrylate liegt bei etwa $+60$ °C als Mittelwert eines Temperaturbereiches von etwa $+30$ °C bis etwa $+90$ °C. Die Konsistenz der Acrylate wechselt also von fest zu weich in einem Temperaturbereich, den Verglasungen ohne Sonnenschutz im Sommer leicht erreichen können.

Bei hohen Temperaturen wird der Klebstoff sehr weich und lässt sich bei geringen Kräften reichlich dehnen. Bei tiefen Temperaturen nehmen die Klebstoffe ein sehr steifes Verhalten an. Es sind hohe Kräfte erforderlich, um minimale Verformungen hervorzurufen. Ein Versagen erfolgt schlagartig und ohne Vorankündigung. Acrylate, die für tiefe Temperaturen flexibel modifiziert wurden, beginnen zu fließen. Dieser Bereich liegt jedoch außerhalb der baupraktischen Anwendungen. Versuche an Klebstoffen in Verbindung versagen, bevor dieser Bereich auftritt.

Die Elastizitätsmoduln weichen stark voneinander ab. Um das sehr unterschiedliche Verhalten des Klebstoffes innerhalb der bei Fassaden auftretenden Temperaturspanne zu umgehen, wird empfohlen, Acrylate vorzugsweise im Innenbereich bei gleichbleibenden Temperaturen einzusetzen. Bei Anwendungen im Außenbereich sind die zu erwartenden

Temperaturen abzuklären und mit den unterschiedlichen Elastizitätsmoduln bei der Berechnung zu berücksichtigen.

13.2.3 Feuchtebeständigkeit

Die Alterungsbeständigkeit wurde in vorangehenden Untersuchungen begutachtet. Die Beanspruchbarkeit einer Klebverbindung nimmt bei permanenter Feuchteeinwirkung aus reinem Wasser oder purem Reinigungsmittel ab.²⁰¹ Um ein vorzeitiges Versagen zu vermeiden, sind Konstruktionen in trockener Umgebung erforderlich. Ist häufige Feuchtigkeit dennoch nicht zu vermeiden, kann die Klebfuge mit Silikon ummantelt werden. Direkter Kontakt mit Feuchte wird somit umgangen. Die Verträglichkeit von Silikon und Acrylat ist nachzuweisen.

13.2.4 UV-Beständigkeit

Häufig werden Bedenken wegen der UV-Beständigkeit der strahlungshärtenden Acrylate geäußert. Deshalb wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die Beständigkeit der untersuchten Acrylate gegen photochemische Alterung gewährleistet ist. Die UV-Stabilität wurde nach ETAG 002-1 an Hand von zwei Alterungsszenarien nachgewiesen und erfolgreich getestet.²⁰²

13.2.5 Kriechen

Langzeitversuche an geklebten Verbindungen mit Acrylaten lieferten unter Last im Vergleich zu Silikon ein sehr gutes Bild. Verformungen traten nur im geringen Umfang auf.²⁰³

²⁰¹ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 206 f.

²⁰² Kurzweilige UV-Strahlungen können unmittelbar chemische Bindungen von Kunststoffen aufspalten. Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindungen, aus denen Acrylatklebstoffe aufgebaut sind, dissoziieren bei Wellenlängen von 290 nm. Vergleiche hierzu Franck 1984, Seite 235 ff. und Lechner 2003, Seite 479 ff. Der sogenannte SUN-Test beinhaltet die Prüfung von Klebungen gegenüber UV-Strahlung bei gleichzeitiger Wasserlagerung unter mittlerer Temperatur. Die Prüfkörper wurden so über einen Zeitraum von 21 Tagen bewittert. Weiterhin wurden Prüfkörper über den gleichen Zeitraum einer reinen UV-Bestrahlung ausgesetzt. Die beiden in dieser Arbeit untersuchten Klebstoffe zeigten einen Festigkeitsverlust lediglich bei dem SUN-Test - UV-Bestrahlung kombiniert mit Wasserlagerung, der durch die Einwirkung des Wassers verursacht wurde. Beim reinen UV-Test hingegen blieben die Festigkeitswerte nahezu unverändert. Vergleiche hierzu ETAG 002-1 und Tasche 2007, Seite 84 f.

²⁰³ Vergleiche hierzu Tasche 2007, Seite 96 ff.

13.2.6 Feuerbeständigkeit

Im Falle eines Brandes muss die Tragfähigkeit des Bauwerkes über einen festgelegten Zeitraum gewährleistet sein. Da die Acrylate keine Anforderung diesbezüglich erfüllen, muss bei komplexeren Tragstrukturen über ein Fail-Safe-Konzept der Ausfall kompensiert werden.

13.3 Entwurf der Klebverbindung

13.3.1 Geometrie der Klebfuge

Man unterscheidet in Abhängigkeit von der Konstruktion punktförmige, linienförmige und flächige Klebverbindungen. Linienförmige Klebfugen werden je nach Ausbildung der Füge-teile mit Ein-, Zwei- oder Drei-Flanken-Haftung ausgeführt. Im Hinblick auf die Strahlungshärtung ist eine möglichst einfache Geometrie der Klebfuge zu bevorzugen.

Klebverbindungen mit Acrylaten können in sehr geringen Fugendicken hergestellt werden. Klebfugen mit Schichtdicken von 0,1 mm sind realisierbar. Die maximale Fugendicke für UV-Härtung liegt bei etwa 1,0 mm. Bei dickeren Klebfugen behindert der Klebstoff in den oberen Schichten ein Durchdringen weiterer UV-Strahlung und somit eine vollständige Aushärtung. In diesen Anwendungen muss auf eine Aushärtung mit sichtbarem Licht ausgewichen werden. Dadurch muss eine verlängerte Bestrahlzeit eingeplant werden, die sich im Minutenbereich bewegt. Auf diese Weise sind Klebfugen von mehreren Millimetern Dicke möglich.

Für Bauteilanwendungen werden Fugendicken ab 0,5 mm empfohlen. Somit sind zwar nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft, eine äußerst dünne Klebfuge umzusetzen. Aber es können im gewissen Umfang Toleranzen ausgeglichen werden und - der wichtigere Aspekt - die in der Klebfuge auftretenden Spannungsspitzen fallen geringer aus. Der Spannungsverlauf über die Fuge zeigt ein gleichmäßigeres Bild. Die Spannungsspitzen, die an den Rändern auftreten, werden bei dickeren Fugen deutlich abgemindert.

Als sinnvoll erweist sich, die Dimensionierung der Klebfuge mit einer Parameterstudie zu beginnen.²⁰⁴ Dabei kann das komplexe System des Bauteils auf ein vereinfachtes Ersatzsystem reduziert werden. Die wesentlichen Randbedingungen, die das System beschreiben - wie Scheibenbreite, Auflagerung, Belastungsrichtung - sind zu erfassen. Die Spannungsverteilung in der Klebfuge wird von mehreren Parametern beeinflusst. So haben nicht nur die Steifigkeiten der beiden Fügeteile, sondern auch die Abmessungen der Klebfläche ihren Einfluss. Besonders bei Belastung senkrecht zur Klebfläche ist darauf zu achten, dass diese nicht zu groß dimensioniert wird. Auf Grund der elastischen Bettung kommt es zu einem Wechselspiel von Zug- und Druckspannungen. Durch Veränderung der Fläche, sowohl in Größe als auch in Form, kann das Spannungsbild wesentlich beeinflusst werden.

13.3.2 Ausbildung der Auflager

Die Anordnung des Auflagers mittig über der Klebfugenebene reduziert eine zusätzliche Momentenbelastung in der Klebfuge. Generell ist eine gelenkige Lagerung vorzuziehen, die Momentbelastungen in der Klebfuge vermeidet.

Klebsverbindungen mit Acrylaten sind bei Raumtemperatur hochfest. Zwängungen, die durch thermische Spannungen und unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten entstehen, können bei festen Lagerungen nicht durch den Klebstoff aufgenommen werden. Eine zwängungsfreie Lagerung der Konstruktion in Scheibenebene ist daher erforderlich.

Bei punktförmigen Lagerungen sollten entsprechend den Konstruktionshinweisen für punktförmig gebohrte Lagerungen Verformungsmöglichkeiten auf Grund von thermischen Spannungen gegeben sein. Dies erfolgt durch gezielte Anordnung von festen und verschieblichen Lagern.²⁰⁵ Eine verschiebliche Lagerung in Scheibenebene kann durch Langlöcher in der Unterkonstruktion oder durch Einsatz von Materialien mit geringen Reibwiderständen erreicht werden.

²⁰⁴ Vergleiche hierzu die Parameterbetrachtung in Abschnitt 12.1.4.

²⁰⁵ Vergleiche hierzu Weller 2008, Seite 66 f. und Wörner 2001, Seite 84 ff.

Bei Konstruktionen mit linienförmiger Lagerung müssen die unterschiedlichen Verformungen der einzelnen Bestandteile durch Temperatur durch die Klebfuge aufgenommen werden. Dies kann durch eine geschickte Wahl eines Klebstoffes mit einer geringeren Steifigkeit und einer dickeren Klebfugenausbildung erreicht werden.

Komplexen Glaskonstruktionen mit geklebten Verbindungen muss ein Fail-Safe-Konzept zu Grunde gelegt werden. Fällt ein Detailpunkt aus, versagt eine Klebverbindung, übernehmen andere Verbindungspunkte diese Aufgabe. Es kommt nicht sofort zum Versagen der gesamten Konstruktion.²⁰⁶

13.4 Bemessung der Klebverbindung

13.4.1 Beanspruchung

Die Bemessung einer Klebverbindung erfordert die genaue rechnerische Abbildung der Lagerung des Systems gemäß der umzusetzenden Konstruktion. Die hier mitgeteilten Empfehlungen zu Berechnung und Bemessung gelten für Beanspruchungen unter quasi-statischer Last. Bei schlagartigen Belastungen, wie sie im Fall einer Absturzsicherung durch den Anprall eines Körpers auftreten, sind zusätzliche Untersuchungen erforderlich.

Bei schlagartiger Beanspruchung treten die Kräfte plötzlich und mit hoher Geschwindigkeit auf. Mit 3 m/s ²⁰⁷ überschreitet diese deutlich die Geschwindigkeiten, mit der quasi-statische Lasten auf Bauteile einwirken. Die schnell auftretenden Kräfte erfordern Klebstoffe, die in ihrem Materialverhalten diesen Anforderungen angepasst sind. Es sind schlagzähmodifizierte Formulierungen erforderlich. Gleichzeitig zur Aufnahme von hohen Kräften müssen ausreichend Verformungen ermöglicht werden. Neben der Klebstoffformulierung hängt die Schlagzähigkeit einer Verbindung ebenso von dem Fügebaumaterial und von der Klebschicht-

²⁰⁶ Seit den späten 1980er Jahren wird das Glas zunehmend in lastabtragender Funktion eingesetzt. Schon die ersten großen Entwürfe, wie die viel beachteten Glashäuser der Cité des sciences et de l'industrie in Paris, entwickeln redundante Systeme zur Lastabtragung. Vergleiche hierzu Rice 1990, Seite 69 ff.

²⁰⁷ Geschwindigkeit 3 m/s gilt für Fallhöhe von 450 mm gemäß TRAV 2003, Seite 5 (Pendelfallhöhe für Verglasungen der Kategorie C). Vergleiche hierzu auch Tautenhahn 2005, Seite 26.

dicke ab. Vor einer Ausführung sind hierzu weitere Prüfungen durchzuführen. Beispielsweise geben Untersuchungen an einem geklebten Prüfkörper mit einem Pendelschlagwerk Auskunft über die Schlagzähigkeit einer Verbindung.²⁰⁸

13.4.2 Materialkennwerte

Für die Ermittlung der Materialkennwerte stehen zwei Verfahren zur Verfügung. Mit Substanzprüfkörpern wird das Materialverhalten des reinen Klebstoffes untersucht, mit in-situ-Prüfkörpern wird das Zusammenwirken von Klebstoff und Füge teil bewertet.

Substanzproben sind Prüfkörper aus dem reinen Bulkmaterial. Im Speziellen eignen sich standardisierte Schulterstäbe. Unter Aufbringen einer Zugbelastung können die Zugeigenschaften begutachtet und die Materialkennwerte, wie Elastizitätsmodul und Streckgrenze, ermittelt werden. Wird dabei, vorzugsweise mit einer berührungslosen Wegmessung wie mit einem Videoextensometer, gleichzeitig zur Längsdehnung auch die Querdehnung aufgenommen, kann die Querdehnzahl als negativer Quotient der beiden Dehnungen berechnet werden.

Zur Vorgehensweise sind die Hinweise der ISO 527 zu beachten. Die Schulterstäbe werden mit einer Prüfgeschwindigkeit gezogen, die gemäß ISO 527 zu wählen ist. Die Geschwindigkeiten reichen von 1 mm/min - eine sehr langsame Geschwindigkeit, die rieselnden Schnee beschreibt - bis zu 500 mm/min - eine schnelle Geschwindigkeit, die Wind simuliert. Eine Beschränkung auf zwei Geschwindigkeiten trifft ISO 10350. Spröde Kunststoffe sind mit 5 mm/min, alle weiteren mit 50 mm/min zu prüfen. Polymere zeigen in Abhängigkeit von der Vernetzung der Polymerketten bei verschiedenen Geschwindigkeiten unterschiedliche Ergebnisse. Daher ist eine Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit generell anzuraten.

Die Ermittlung des Elastizitätsmoduls wird bei einer Versuchsgeschwindigkeit von 1 mm/min durchgeführt. Vorge-

²⁰⁸ Für Glas-Metall-Klebungen wird die Schlagzähigkeit in Anlehnung an ISO 9653 mit einem modifizierten Prüfkörper ermittelt. Vergleiche hierzu DELO-Norm 35 in Weigel 2007.

geben ist ein Auswertebereich, der das anfängliche Materialverhalten beschreibt. Aus den Werten bei Dehnungen von 0,05 % und 0,25 % und den dazugehörigen Spannungen erfolgt die Berechnung des Elastizitätsmoduls. Um Unregelmäßigkeiten aus Anfahreffekten zu vermeiden, ist eine Vorkraft in Abhängigkeit der erwarteten Steifigkeit anzusetzen. Als vorteilhaft bei dieser Methode der Kennwertermittlung erweist sich, dass sich die Versuche recht einfach unter verschiedenen Temperaturen und Geschwindigkeiten durchführen lassen. Das Materialverhalten des reinen Klebstoffes mit den Kohäsionskräften wird beschrieben. Es kann jedoch keine Aussage über das Zusammenwirken von Klebstoff und Füge teil und die wirkenden Adhäsionskräfte getroffen werden.

Dies erfolgt durch die zweite Methode. An Hand von in-situ-Prüfkörpern wird die Klebung in Verbindung mit den Füge teilen analysiert.²⁰⁹ Beim Aushärten des Klebstoffes wird am Übergang zum Füge teil der Klebstoff verändert. Durch Wechselwirkungen zwischen Klebstoff und Füge teil bildet sich in einem schmalen Bereich eine sogenannte Grenzschicht, die aus dem Klebstoffmaterial besteht, aber steifere Eigenschaften besitzt. Besonders bei dünnen Klebschichten haben diese gradierten Eigenschaften einen Einfluss auf die gemittelten Materialkennwerte. Bei dickeren Klebfugen ist der Einfluss vernachlässigbar. Werden in-situ-Prüfkörper zur Ermittlung von Materialkennwerten geplant, sollte hierbei vorzugsweise die Rohrprobe gewählt werden. Im Gegensatz zu den ein- oder zweischnittig überlappenden Prüfkörpern wird hier sowohl bei Zug- als auch bei Torsionsbelastung ein gleichmäßiger Spannungszustand erzielt. Durch die geschlossene ringförmige Klebfuge treten keine Spannungsspitzen auf, die die Ermittlung der Kennwerte erschweren.

Einen Ausgangspunkt für die Kennwertermittlung an der Rohrprobe bietet EN 14869-1. Da die Norm für Metalklebungen ausgelegt ist, muss der Aufbau für Glasklebungen modifiziert werden. Eine kreisförmige Scheibe aus Glas wird zwischen die beiden Hohlprofile angeordnet. Die zu untersuchende Klebung mit Acrylat ist sorgfältig auszuführen. Eine

²⁰⁹ Die Füge teile und eine eventuelle Vorbehandlung der Oberflächen sollen dabei wie in der geplanten Bauteilanwendung gewählt werden.

geschlossene, nicht unterbrochene Ausbildung der ringförmigen Klebfuge ist wichtig. Die zweite Klebung, die nicht in die Auswertung mit einfließt, ist mit einem höherfesten Klebstoff herzustellen. Diese Methode eignet sich vorzugsweise für dünne Schichtdicken bis 0,5 mm. Durch Annahme einer behinderten Querdehnung treten bei dicken Klebfugen und bei Klebstoffen mit Querdehnzahlen größer als 0,49 zu hohe Abweichungen auf. Für dünne Klebfugen stellt diese Methode eine sehr aussagekräftige Möglichkeit dar, die Kennwertermittlung an geklebten Verbindungen durchzuführen.

13.4.3 Berechnung

Wegen der oft komplexen Geometrie und der verschiedenen zusammenwirkenden Materialien einer geklebten Bauteilanzwendung erfolgt die Berechnung mit einem leistungsstarken Finite-Elemente-Programm.²¹⁰ Vorhandene Symmetrien können genutzt werden, um die Modellierung des Gesamtsystems zu reduzieren. Die genaue Abbildung der Spannungsspitzen an den Rändern der Klebfuge erfordert eine feine Elemententeilung. Sowohl in der Fläche als auch in der Höhe der Klebfuge zeigt sich ein dichteres Elementnetz vorteilhaft. Dadurch erhöht sich die Gesamtzahl der Elemente. Eine gleichzeitig ansteigende Rechenzeit erfordert ein Abwägen von Aufwand und Nutzen.

Zum Nachweis der Tragfähigkeit der Konstruktion werden die Adhäsionskräfte, die den Zusammenhalt zwischen Füge- teil und Klebstoff bewirken, nicht simuliert. Deshalb können die verschiedenen aneinander stoßenden Schichten mit unterschiedlichen Materialien aus nebeneinander liegenden Volumenelementen gebildet werden. Günstigerweise werden solche Elementtypen gewählt, mit denen variable Materialgesetze zu beschreiben sind. Das Programm ANSYS® bietet dafür den Elementtyp Solid185. Werden Biegebeanspruchungen erwarten, ist über einen Zusatzbefehl eine enhanced strain Formulierung einzustellen.

Für die Acrylate hat sich sowohl bei den Substanzproben als auch bei den in-situ-Prüfkörpern im baupraktisch relevanten

²¹⁰ In der vorliegenden Arbeit wurde das Programm ANSYS® verwendet.

Bereich ein lineares Materialverhalten gezeigt, das in den FE-Berechnungen demnach auch angesetzt wird.

Die Lagerung des Systems ist sorgfältig entsprechend der geplanten Konstruktion abzubilden. Nur so können die wirklichen Beanspruchungen im Gesamtsystem erfasst werden. Besonders die Spannungsverteilung in der Klebfuge zeigt sich empfindlich gegenüber Veränderungen im Auflagerpunkt. Kleine Lageunterschiede der Befestigung an die Unterkonstruktion drücken sich durch Spannungsverlagerungen in der Klebfläche aus. Dies verdeutlicht nochmals die besonderen Anforderungen, die an die Diskretisierung und an das verwendete FE-Programm gestellt werden.

13.5 Herstellung der Klebverbindung

13.5.1 Vorbehandlung

Das Herstellen von Verbindungen mit UV- und lichthärtenden Acrylaten ist sorgfältig zu planen. Alle Verbindungsstellen sind gründlich mit dem seitens des Klebstoffherstellers empfohlenen Reiniger zu entfetten und zu säubern. Die Klebstelle darf daraufhin nicht mehr berührt werden, um keine nachträglichen Verunreinigungen aufzubringen. Weiterhin sollte das Kleben werkseitig unter kontrollierten Bedingungen erfolgen. Eine bauseitige Herstellung ist wegen der unkontrollierten Bedingungen nicht empfehlenswert.

Der Klebstoff muss vor dem Verarbeiten ohne Erhitzen auf Raumtemperatur gebracht werden. Da die strahlungshärtenden Acrylate einkomponentige Systeme sind, in denen der Haftvermittler - oder Primer - integriert sind, ist der Auftrag des Klebstoffes häufig unkompliziert. In Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit der Fügepartner kann eine Oberflächenvorbehandlung sinnvoll sein.²¹¹

13.5.2 Montage

Die Ausbildung der Klebfuge in ihrer Form kann die Entscheidung für einen besonderen Klebstofftyp herbeiführen.

²¹¹ Zur Vorbehandlung von Glas stehen vorzugsweise das Pyrosil®-Verfahren oder eine Reinigung und Aktivierung mit Atmosphärenplasma zur Verfügung. Vergleiche hierzu Habenicht 2006, Seite 547 ff., Geiß 2008, Seite 60 und Tasche 2007, Seite 122.

Für linienförmige Fugengeometrien werden höherviskose Klebstoffe favorisiert. Sie bleiben in Form einer Klebstoffraupe, bis der Auftrag in voller Länge beendet und das Fügeteil aufgelegt ist. Bei punktförmigen und flächigen Klebungen werden gerne niedrigviskose Formulierungen verwendet. Sie fließen auseinander und verteilen sich vor dem Auflegen des Fügeteils nahezu über die gesamte Fläche.

Im Idealfall wird die Dicke der Klebfuge über eine Montagekonstruktion eingestellt. Ergibt sich diese Möglichkeit nicht, so sind Abstandhalter zu nutzen. Dafür kommen verschiedenen Varianten in Frage, beispielsweise Kunststoffplättchen, Metalldraht oder Glasperlen. Diese beeinträchtigen nicht nur das optische Erscheinungsbild, sondern können durchaus das Spannungsbild beeinflussen. Eine weitere Möglichkeit stellen Klebstofftropfen dar, die in der Dicke der Klebfuge aufgetragen und vorab gehärtet werden.

Bei der Montage des Bauteils ist auf einen sorgfältigen und spannungsfreien Einbau zu achten. Lufteinschlüsse in der Klebfuge sind zu vermeiden. Kleinere Luftbläschen im Inneren der Klebfuge haben weniger Einfluss auf die Festigkeit der Klebung als auf das optische Erscheinungsbild. Jedoch sollten Bläschen am Rand oder größere Lufteinschlüsse vermieden werden. Solche Fehlstellen werden den Ausgangspunkt des Versagens bilden beziehungsweise bieten anstehender Feuchtigkeit einen Angriffspunkt zur fortschreitenden Schädigung.

13.5.3 Aushärtung

Zum Schutz vor der schädigenden UV-Strahlung muss eine entsprechende Arbeitsbrille getragen werden.

Die Aushärtedauer und die Intensität der Strahlung sind auf den jeweiligen Anwendungsfall bezogen mit dem Klebstoffhersteller abzustimmen. Die Strahlungsintensität der Lampe ist vor der Ausführung mit dem Intensitätsmessgerät einzustellen. Bisher erfolgt dies über den Abstand. Es sollte jedoch auch über eine Regelung möglich sein.

Die Strahlung muss senkrecht durch das Glas auf die Klebfläche einwirken. Ein abweichender Bestrahlungswinkel oder

eine über Spiegelung indirekte Bestrahlung kann den Klebstoff nicht vollständig aushärten. Da die Polymerisation nur solange aufrecht erhalten wird, wie die Bestrahlung erfolgt, müssen die Aushärtezeiten eingehalten werden. Bei dicken Klebfugen oder bei UV-absorbierenden Materialien wie PVB-Folien, kann mit sichtbarem Licht und längeren Bestrahlzeiten ausgehärtet werden.

Großflächigere Klebverbindungen werden vorzugsweise mit einer zweistufigen Aushärtung hergestellt. Dabei wird mit einer geringeren Intensität vorgehärtet und anschließend mit einer hohen ausgehärtet. Somit werden die Eigenspannungen durch den Härtungsschwund reduziert.

13.6 Überwachung

Geklebte Verbindungen des Konstruktiven Glasbaus sind während der Herstellungsprozesse und nach dem Einbau fortlaufend zu kontrollieren.

Die Herstellung ist durch Facharbeiter mit Erfahrung im Kleben durchzuführen. Eine mängelfreie Ausführung der Klebfugen erfordert in der Regel Werkräume mit kontrollierten klimatischen Verhältnissen. Alle verwendeten Materialien, insbesondere die Chargennummer des Klebstoffes sind zu dokumentieren.

Nach dem Einbau sind die geklebten Verbindungen in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren. Dazu erweist sich das Material Glas als vorteilhaft, da es wegen der Transparenz bei entsprechender Geometrie einen uneingeschränkten Blick auf die Klebfuge erlaubt. Abweichungen in der Klebfuge oder am Rande der Klebfuge sind sichtbar.

Um Veränderungen exakt festzustellen, ist im Bedarfsfall die Klebverbindung fotografisch zu dokumentieren. Nur so können später auch geringe Abweichungen mit Sicherheit vermerkt werden.

14 Zusammenfassung

Das Fügen von Bauteilen aus Glas erfolgt bis heute ganz überwiegend mit mechanischen Verbindungen. Dabei ist der Einbau gebohrter oder geklemmter Punkthalter die Regel.

Strukturelle - das heißt lastabtragende - Klebungen bieten im Vergleich zu mechanischen Verbindungen entscheidende Vorteile. Die lokale Beanspruchung des Glases im unmittelbaren Auflagerbereich ist deutlich niedriger und ermöglicht die Ausführung geringerer Glasdicken. Bei Wegfall der üblicherweise erforderlichen Glasbohrungen ergibt sich eine weitere wesentliche Kosteneinsparung.

Klebverbindungen ermöglichen ein materialgerechtes Konstruieren im Glasbau, müssen aber den zu erwartenden Beanspruchungen gemäß ausgelegt werden. Als Klebstoffe werden im Bauwesen bisher fast ausschließlich ein- oder zweikomponentige Silikone verwendet. Ihren Einsatz finden sie in Structural-Sealant-Glazing-Fassaden, bei denen sie die auf die Glasscheibe wirkende Belastung auf die Unterkonstruktion übertragen.

Silikonklebstoffe sind in ihren physikalischen Eigenschaften und in ihrem Alterungsverhalten weitgehend erfasst. In der Ausführung sind Silikonfugen aufgrund der erforderlichen Klebstoffdicke und der meist schwarzen Einfärbung des Klebstoffes immer deutlich erkennbar.

Die Glasarchitektur fordert dagegen zunehmend mehr Transparenz mit weniger Verbindungsmitteln. UV- und lichthärtende Acrylate empfehlen sich für hochfeste und hochtransparente Klebverbindungen mit sehr schneller Aushärtung, werden aber bisher fast ausschließlich für Inneneinrichtungen aus Glas eingesetzt.

Die vorliegende Arbeit entwickelt Empfehlungen, die Planung und Ausführung von lastabtragenden Klebungen mit UV- und lichthärtenden Acrylaten zu erleichtern. Grundlage bilden Vorarbeiten,²¹² die um wesentliche Untersuchungen erweitert werden. Typische Acrylatklebstoffe werden sowohl

²¹² Vergleiche hierzu Schadow 2006 und Tasche 2007.

als reiner Werkstoff als auch in der Verbindung betrachtet. Diese Unterscheidung ist bei dünnen Klebfugen wesentlich, da sich durch Wechselwirkungen zwischen Fügeteil und Klebstoff eine Grenzschicht mit veränderten Eigenschaften ausbildet. Zur Kennwertermittlung werden deshalb sowohl Substanzprüfkörper als auch in-situ-Prüfkörper herangezogen.

Das reine Klebstoffmaterial wird in Form von standardisierten Schulterstäben unter variierenden Prüfgeschwindigkeiten und Temperaturen untersucht. Zugversuche mit einer berührungslosen biaxialen Verformungsmessung erlauben die direkte Ermittlung des Elastizitätsmoduls und der Querdehnzahl. Dabei zeigt sich das geschwindigkeits- und temperaturabhängige Verhalten des Materials. Der Elastizitätsmodul und die auftretenden Streckspannungen steigen mit höherer Geschwindigkeit. Auf die Querdehnzahl scheint sie keinen Einfluss zu haben.

Besonders auffällig ist die Abhängigkeit der Materialeigenschaften von der Temperatur. Basierend auf der Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glasstrukturen (Structural-Sealant-Glazing-Systems) wurde der Temperaturbereich von -20 °C bis $+80\text{ °C}$ durch das Versuchsprogramm abgedeckt.²¹³ Bei niedrigen Temperaturen verhalten sich die Klebstoffe sehr steif. Das Versagen tritt bei hohen Kräften, aber geringen Dehnungen ein. Dagegen zeigen die Klebstoffe ein sehr weiches Verhalten bei hohen Temperaturen. Die Steifigkeiten weichen deutlich voneinander ab.

Ein ähnlich ausgeprägtes temperaturabhängiges Verhalten zeigen die Untersuchungen an in-situ-Prüfkörpern. Hierzu wurde die sogenannte Rohrprobe gewählt. Durch eine geschlossene ringförmige Klebfugengeometrie wird ein gleichmäßiger Spannungsverlauf sowohl bei Zug- als auch bei Torsionsbelastung gewährleistet. Der für reine Metallklebungen erprobte Aufbau musste modifiziert werden, um Acrylatklebstoffe in Glas-Metall-Verbindungen zu untersuchen. Unter Annahme einer behinderten Querdehnung können die elastischen Materialparameter zuverlässig ermittelt werden.

²¹³ Vergleiche hierzu ETAG 002-1.

Auf Grundlage dieser an der Rohrprobe ermittelten Materialkennwerte werden kleinteilige Prüfkörper mit dem FE-Programm ANSYS® modelliert. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus numerischer Berechnung mit den Versuchswerten. Die Kleinteilversuche - Zylinderzugprüfkörper und Druckscherprüfkörper - basieren auf bewährten Glas-Metall-Prüfkörpern²¹⁴, die zur genaueren Dehnungsmessung modifiziert wurden. Aus den Versuchsergebnissen kann der baupraktisch relevante Bereich ermittelt werden, bis zu dem die Berechnung eine gute Übereinstimmung zeigen sollte. Neben der Modellierung der beschriebenen Kleinteilversuche wird an Variantenuntersuchungen der Einfluss der Schichtdicke und der Fügeteilgeometrie in Grundzügen betrachtet.

Bauteilversuche dienen dazu, die Machbarkeit nachzuweisen und den Kenntnisstand zu erweitern. Punktförmig geklebte Absturzsicherungen wurden einer statischen Belastung unterworfen sowie mit einem Pendelschlagversuch zur Simulation eines Personenanpralls geprüft. Bei letzterem gingen sämtliche Glasscheiben zu Bruch. Eine nachträgliche Untersuchung an Kleinteilprüfkörpern zeigte eine geringe Schlagzähigkeit des verwendeten Klebstoffes. Werden Belastungen mit höherer Geschwindigkeit erwartet, ist ein schlagzäh modifizierter Klebstoff einzusetzen, der durch seine Formulierung hohe Kräfte und gleichzeitig große Dehnungen aufnehmen kann. Eine gelenkige Lagerung in Ebene der Klebfuge reduziert die Einspannwirkung und mindert die aufzunehmenden Spannungen in der Klebfuge.

Weiterhin wurden an punktförmig geklebten Überkopfverglasungen die Tragfähigkeit und die Resttragfähigkeit erfolgreich nachgewiesen. In der Freibewitterung zeigten sich an einigen geklebten Punkthaltern Veränderungen, die möglicherweise auf eine Delamination hinweisen. Der Ursprung liegt in der festen Lagerung. Zwängungen durch unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten können nicht aufgenommen werden. Wie bei punktförmig gebohrten Verglasungen ist auch bei geklebten Konstruktionen eine zwängungsfreie Lagerung erforderlich.

²¹⁴ Vergleiche hierzu Tasche 2007.

Berechnungen beider Bauteilanwendungen zeigen teilweise gute Übereinstimmung mit den während der statischen Belastung aufgenommenen Dehnungswerten. Ein Augenmerk ist auf die Modellierung der Klebfuge zu legen. Eine feine Elemententeilung bildet die Spannungsspitzen an den Klebfugenrändern genau ab, erfordert jedoch eine verlängerte Rechenzeit. Hier sind Aufwand und Nutzen abzuwägen. In der Klebfuge entsteht bei Belastung senkrecht zu ihr ein Spannungsbild, bei dem sich Zug und Druck abwechseln. An Hand einer Parameterstudie zeigt sich der Einfluss der Größe und der Form der Klebfläche auf die Spannungsverteilung. Neben der Klebfugendicke beeinflusst sowohl die Dicke der Fügeteile als auch die Anordnung des Auflagers das Spannungsbild in der Klebfuge.

Resultierend aus diesen vielfältigen und umfangreichen Untersuchungen werden Empfehlungen ausgesprochen, die die Einsatzmöglichkeiten von Acrylatklebungen im Konstruktiven Glasbau umreißen und Hinweise zur Planung und Umsetzung einschließen.

Bevor letztendlich Acrylatklebungen im Konstruktiven Glasbau umgesetzt werden können, sind noch einige offene Punkte zu klären. Zeitstandversuche mit verschiedenen Lastniveaus müssen Aussagen über die Langzeitbeständigkeit ermöglichen. Sowohl an Substanzproben als auch an in-situ-Prüfkörpern sind dynamische Untersuchungen erforderlich, um das Verhalten zum Beispiel unter andauernder Windbelastung zu klären. Eine weitere Fragestellung bildet die Beeinflussung durch die Art und Anordnung der Abstandhalter und die Ausführung der Aushärtung.

Eine weitere intensive Beschäftigung mit lastabtragenden Klebungen im Konstruktiven Glasbau kann den Weg zu erfolgreichen Ausführungen ebnen. Vielfältige und interessante Möglichkeiten bieten sich für Acrylatklebungen an, das Material Glas und die tragende Konstruktion im Vordergrund stehen zu lassen.

15 Literatur

15.1 Fachbücher und Fachaufsätze

- Adams 2005 Adams, Robert D.: Adhesive Bonding. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- Altner 2005 Altner, Manfred; et. al.: Stadtlexikon Radebeul. Radebeul: Stadtarchiv, 2005.
- Barthel 2007 Barthel, Clemens: Numerische und experimentelle Untersuchungen an Klebverbindungen mit gradierter Klebschicht. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel. Aachen: Shaker, 2007.
- Behling 2008 Behling, Stefan: glass technology live - Dokumentation. Sonderschau und Symposium auf der Internationalen Fachmesse glasstec 2008. Düsseldorf: Messe, 2008.
- Bieker 2006 Bieker, Cornelia: Methodenentwicklung zur Bestimmung des hygrothermomechanischen Langzeitverhaltens von strukturellen Klebverbindungen mit metallischen und mineralischen Untergründen. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel. Aachen: Shaker, 2006.
- Bolus 2006 Bolus, Michael; Schmitz, Ralf W.: Der Neandertaler. Ostfildern: Jan Thorbecke, 2006.
- Bornemann 2004 Bornemann, Jörg: Experimentelle und numerische Untersuchung von EP-Klebstoffen im Hinblick auf die Modellbildung zur Berechnung geklebter Verbindungen. Dissertation. Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel. Aachen: Shaker, 2004.
- Brede 2006 Brede, Markus; et. al: Methodenentwicklung zur Berechnung von höherfesten Stahlklebverbindungen des Fahrzeugbaus unter Crashbelastung. In: Dechema: 6. Kolloquium. Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik. Tagungsband. Frankfurt: Dechema, 2006. Seite 38-40.
- Brockmann 2005 Brockmann, Walther; Geiß, Paul Ludwig; Klingen, Jürgen; Schröder, Bernhard: Klebtechnik: Klebstoffe, Anwendungen und Verfahren. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- Bucak 2006 Bucak, Ömer; Hagl, Anneliese: Kleben im Bauwesen gestern, heute, morgen. In: Stahlbau 75, Heft 6. Berlin: Ernst, 2006. Seite 499-507.
- CADFEM 2005 CADFEM: Modellierung und Berechnungen von Klebverbindungen. Seminarunterlagen. Grafing: CADFEM GmbH, 2005.
- DELO 2008 DELO Industrie Klebstoffe (Hrsg.): Leitfaden zum fachgerechten Kleben von Glas im Innenbereich. Windach: DELO, 2008.
- Dilger 2005 Dilger, Klaus: Automobiles. In: Adams, Robert D.: Adhesive Bonding. Boca Raton: CRC Press, 2005. Seite 357-385.
- Dilger 2007 Dilger, Klaus; Feldmann, Markus; Geiß, Paul Ludwig; Pasternak, Hartmut; Ummenhofer, Thomas: Neue Konstruktionen durch Einsatz von Klebverbindungen im Stahlbau. Tagungsband 7. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 2. Zwischenbericht zum AIF-Projekt Nr. 169 ZBG. Frankfurt: DECHEMA, 2007. Seite 23-25.
- Dollhofer 2001 Dollhofer, Josef: Bruchmechanische Charakterisierung der Adhäsion an Polymer/Glas-Grenzflächen. Dissertation. IVW-Schriftenreihe, Band 17. Kaiserslautern: Institut für Verbundwerkstoffe, 2001.
- Doobe 2003 Doobe, Marlene; Beyle, Hans Peter; Gieseke, Axel: Structural Glazing nach allen Regeln der Kunst. In: Adhäsion, Kleben & Dichten, Heft 6. Wiesbaden: Vieweg, 2003. Seite 16-20.
- Düpmeyer 2007 Düpmeyer, Tobias: Untersuchungen zum Crashverhalten kalthärtender Klebstoffsysteme in Aluminiumverbindungen. Dissertation. Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik. Aachen: Shaker, 2007.

- Elias 1999 Elias, Hans-Georg: Makromoleküle. Band 1: Chemische Struktur und Synthesen. Weinheim, New York, Chichester, Brisbane, Singapore, Toronto: Wiley-VCH, 1999.
- FCI 2001 Fonds der Chemischen Industrie (Hrsg.): Kleben/Klebstoffe. Informationsserie des Fonds der chemischen Industrie. Heft 27. Frankfurt: FCI, 2001.
- Feldmann 2006 Feldmann, Markus; Völling, Boris; Geißler, Achim; Wellershoff, Frank; Geiß, Paul Ludwig; Wagner, Astrid: Kleben im Stahlbau. In: Stahlbau 75, Heft 10. Berlin: Ernst, 2006. Seite 834-846.
- Franck 1984 Franck, Adolf: Kunststoff-Kompendium. Würzburg: Vogel, 1984.
- Geiß 2006 Geiß, Paul Ludwig: Klebtechnik übernimmt tragende Rolle im Bauwesen. In: Adhäsion, Kleben & Dichten, Heft 1. Wiesbaden: Vieweg, 2006. Seite 14-18.
- Geiß 2008 Geiß, Paul Ludwig; et al.: Verbesserung der Beständigkeit von Glasklebungen durch prozessintegrierbare Vorbehandlungsverfahren. In: Weller, Bernhard (Hrsg.): glasbau2008. Tagungsband. Dresden: Technische Universität 2008. Seite 59-72.
- Gerngross 1933 Gerngross, Otto; Goebel, E.: Chemie und Technologie der Leim- und Gelatine-Fabrikation. Dresden, Leipzig: Steinkopf, 1933.
- Grellmann 2005 Grellmann, Wolfgang; Seidler, Sabine: Kunststoffprüfung. München Wien: Hanser, 2005.
- Habenicht 2006 Habenicht, Gerd: Kleben: Grundlagen, Technologie, Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2006.
- Häßler 2000 Häßler, Rüdiger; Jansen, Irene; Kleinert, Horst: Glastemperaturbestimmung in Klebfugen. In: Adhäsion - Kleben & Dichten, Jahrgang 44 (2000) Heft 7 - 8. Wiesbaden: Vieweg, 2000. Seite 36-39.
- Hagl 2007 Hagl, Anneliese: Bemessung von strukturellen Silikon-Klebungen; In: Stahlbau 76, Heft 8. Berlin: Ernst, 2007. Seite 569-581.
- Hahn 1985 Hahn, Josef: Durchlaufträger, Rahmen, Platten und Balken auf elastischer Bettung. Düsseldorf: Werner, 1985.
- Hahn 2007 Hahn, Ortwin; Fuhrmann, Tino: Zur Berechnung von Klebverbindungen in Fahrzeugstrukturen aus Faser-Kunststoff-Verbunden und Metallen mit Hilfe der Finite Elemente Methode. Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik. Aachen: Shaker, 2007.
- Handing 2006 Handing, Christian: Dimensionierung von Klebverbindungen mit Hilfe der Bruchmechanik. Dissertation. Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik. Aachen: Shaker, 2006.
- Hartshorn 1986 Hartshorn, S. R.: Structural Adhesives. New York, München: Plenum, 1986.
- IfBt 1986 Institut für Bautechnik (IfBt): Grundlagen zur Beurteilung von Baustoffen, Bauteilen und Bauarten im Prüfzeichen- und Zulassungsverfahren - allgemeine Kriterien - experimentell Bestimmung von Eigenschaften - Festlegung von Kontrollen. Berlin: Beuth, 1986.
- IWS 2005 Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS: Jahresforschungsbericht 2004. Dresden: Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS 2004.
- Jansen 2004a Jansen, Irene: Vorbehandlung und Klebstoffauswahl. In: Weller, Bernhard (Hrsg.): glasbau2004. Tagungsband. Dresden: Technische Universität 2004. Seite 89-96.
- Jansen 2004b Jansen, Irene; Schneider, Dieter; Beyer, Eckhard: Anwendung der LAwave-Methode zur Charakterisierung von Klebschichten. In: Schindel-Bidinelli (Hrsg.): 18. Internationales Symposium Swiss Bonding 2004. Tagungsband. Bülach: Swibotech, 2004. Seite 17-19.

- Kleinert 2001 Kleinert, Horst; Häßler, Rüdiger; Jansen, Irene: Erzeugung haftvermittelnder dünner Schichten auf Metalloberflächen durch spezielle physikalische und chemische Verfahren. Teilprojektbericht B7 des SFB 1999-2001.
- Kinloch 1987 Kinloch, Andrew J.: Adhesion and Adhesives. London, New York, Tokyo, Melbourne, Madras: Chapman and Hall, 1987.
- Knight 1931 Knigh, E. Vernon; Wulpi, Meinhard: Furniere und Sperrholz, II. Band. Berlin: M. Krayn, 1931.
- Kothe 2008 Kothe, Michael: Alterungsverhalten von polymeren Klebstoffen im Bauwesen. Internes Arbeitspapier. Dresden: Technische Universität, 2008. Bisher unveröffentlicht.
- Kuckenburg 2005 Kuckenburg, Martin: Der Neandertaler. Stuttgart: Klett-Cotta, 2005.
- Lechner 2003 Lechner, Manfred D.; Gehrke K.; Nordmeier, Eckhard H.: Makromolekulare Chemie. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 2003.
- Müller 1998 Müller, Christian: Die Entwicklung des Holzleimbauens unter besonderer Berücksichtigung der Erfindungen von Otto Hetzer- ein Beitrag zu Geschichte der Bautechnik. Dissertation. Weimar: Bauhaus-Universität, 1998.
- Netzsch 2007 Netzsch-Gerätebau GmbH: Bedienungsanleitung: Dynamisch-Mechanische-Analyse DMA 242C. Selb: Netzsch, 2007.
- Noll 1960 Noll, Walther: Chemie und Technologie der Silicone. Weinheim: Verlag Chemie, 1960.
- Ortlepp 2007 Ortlepp, Regin: Untersuchungen zur Verbundverankerung textilbewehrter Feinbetonverstärkungsschichten für Betonbauteile. Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2007.
- Peters 2006 Peters, Stefan: Kleben von GFK und Glas für baukonstruktive Anwendungen. Dissertation. Stuttgart: Universität, 2006.
- Petzold 1990 Petzold, Armin; Marusch, Hubert; Schramm, Barbara: Der Baustoff Glas. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1990.
- Phung 2005 Phung, Lan Huong: Grenzflächenuntersuchungen an geklebten Fügeteilen und Entwicklung von Methoden zur Verbesserung der Klebfestigkeit. Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2005.
- Possart 2005 Possart, Wulff: Adhesion. Weinheim: Wiley-VCH, 2005.
- Prautzsch 2005 Prautzsch, Volker: Klebungen in Abhängigkeit von Fläche und Schichtdicke. Diplomarbeit. Dresden: Technische Universität, 2005.
- Rice 1990 Rice, Peter; Dutton, Hugh: Le Verre structurelle. Paris: Editions du Moniteur, 1990.
- Richter 2005 Richter, Mike: Entwicklung mechanischer Modelle zur analytischen Beschreibung der Materialeigenschaften von textilbewehrtem Feinbeton. Dissertation. Berichte des Institutes für Mechanik und Flächentragwerke, Heft 2. Dresden: Technische Universität, 2005.
- Roos 2005 Roos, Eberhard; Maile, Karl: Werkstoffkunde für Ingenieure. Berlin Heidelberg: Springer, 2005.
- Schadow 2006 Schadow, Thomas: Beanspruchungsgerechtes Konstruieren von Klebverbindungen in Glastragwerken. Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2006.
- Schlimmer 2004 Schlimmer, Michael; et. al.: Berechnung und Auslegung von Klebverbindungen, Teil 1 - 9, In: Adhäsion - Kleben & Dichten, Jahrgang 48, Heft 5 - 12. Wiesbaden: Vieweg, 2004.
- Schlimmer 2007 Schlimmer, Michael: Experimentelle Ermittlung des mechanischen Verhaltens von Kunststoffklebverbindungen mit orts aufgelöster Verformungsmessung. In: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik. 7. Kolloquium. Frankfurt: Dechema, 2007. Seite 59-60.

- Schmidt 2007 Schmidt, Michael; Krelaus, Ralf; Teichmann, Thomas; Leutbecher, Torsten; Fehling, Ekkehard: Fügen von Bauteilen aus UHPC durch Kleben. Voruntersuchungen und Anwendung bei der Gärtnerplatzbrücke in Kassel. In: Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 10. Berlin: Ernst, 2007. Seite 681-690.
- Tasche 2007 Tasche, Silke: Strahlungshärtende Acrylate im konstruktiven Glasbau. Dissertation. Dresden: Technische Universität, 2008.
- Tautenhahn 2005 Tautenhahn, Lutz: Stoßartige Beanspruchung absturzsichernder Verglasungen. Diplomarbeit. Dresden, Technische Universität, 2005.
- Volkersen 1938 Volkersen, Olaf: Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. In: Luftfahrtforschung, Band 15, Heft 1/2. 1938. Seite 41-47.
- Volkersen 1953 Volkersen, Olaf: Die Schubkraftverteilung in Leim-, Niet- und Bolzenverbindungen. In: Energie und Technik. 1953. Seite 68-71, 103-108 und 150-154.
- Weigel 2007 Weigel, Gudrun: BOND it - Nachschlagewerk zur Klebtechnik. Landberg am Lech: DELO Industrie Klebstoffe, 2007.
- Weller 2005 Weller, Bernhard; Tasche, Silke; Vogt, Iris: Glasbau. In: Entwurfs- und Berechnungstabellen für Bauingenieure. Berlin: Bauwerk, 2005. Seite 5.45-5.65.
- Weller 2006 Weller, Bernhard; Jansen, Irene; Prautzsch, Volker; Tasche, Silke; Vogt, Iris: Fügen und Verbinden mit UV- und lichthärtenden Acrylaten. In: Stahlbau 75. Heft 6. Berlin. Ernst, 2006. Seite 521-528.
- Weller 2007a Weller, Bernhard; Tasche, Silke: Glasbau. In: Wendehorst Bautechnische Zahlentabellen. Wiesbaden: Teubner, 2007. Seite 883-914.
- Weller 2007b Weller, Bernhard; Prautzsch, Volker; Tasche, Silke; Vogt, Iris: Einsatz höherfester Klebstoffe im Glasbau. In: VDI-Jahrbuch 2006/2007 Bautechnik. Düsseldorf: VDI Verlag, 2006. Seite 446-461.
- Weller 2008 Weller, Bernhard; Härth, Kristina; Tasche, Silke; Unnewehr, Stefan: DETAIL Praxis - Konstruktiver Glasbau. Grundlagen, Anwendung, Beispiele. München: Institut für internationale Architektur-Dokumentation, 2008.
- Weller 2009 Weller, Bernhard; Nicklisch, Felix; Thieme, Sebastian; Weimar, Thorsten: Glasbau-Praxis. Konstruktion und Bemessung. Berlin: Bauwerk-Verlag, 2009.
- Wellershof 2006 Wellershof, Frank: Nutzung der Verglasung zur Aussteifung von Gebäudehüllen. Dissertation. Schriftenreihe Stahlbau - RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2006.
- Wirth 2004 Wirth, Cornelius: Berechnungskonzept für die Klebflanschfestigkeit in Gesamtkarosseriemodellen. Dissertation. München: Technische Universität, 2004.
- Witek 2004 Witek, Günther: Modifizierte Acrylat-Klebstoffe DELO-PHOTOBOND für konstruktive Glasverklebungen. In: Weller, Bernhard (Hrsg.) glasbau2004. Tagungsband. Dresden: Technische Universität 2004. Seite 97 -105.
- Wölfer 1978 Wölfer, Karl-Heinz: Elastisch gebettete Balken und Platten. Zylinderschalen. Wiesbaden, Berlin: Bauverlag, 1978.
- Wörner 2001 Wörner, Johann-Dietrich; Schneider, Jens; Fink, Andreas: Glasbau - Glasbau, Berechnung, Konstruktion. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer, 2001.

15.2 Normen und Richtlinien

DIN 1055-4	DIN 1055-4, März 2005: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 4: Windlasten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2005.
DIN 1055-5	DIN 1055-5, Juli 2005: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 5: Schnee- und Eislasten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2005.
DIN 1249-10	DIN 1249-10, August 1990: Flachglas im Bauwesen - Teil 10: Chemische und physikalische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1990.
DIN 1259-1	DIN 1259-1, September 2001: Glas - Teil 1: Begriffe für Glasarten und Glasgruppen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001.
DIN 8580	DIN 8580, September 2003: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
DIN 8593-0	DIN 8593-0, September 2003: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Deutsche Norm. Berlin: Beuth 2003.
DIN 8593-8	DIN 8593-8, September 2003: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 8: Kleben - Einteilung, Unterteilung, Begriffe. Deutsche Norm. Berlin: Beuth 2003.
DIN 18008-1	DIN 18008-1, März 2006: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 1: Begriffe und allgemeine Grundlagen. Deutsche Norm, Entwurf. Berlin: Beuth, 2006.
DIN 18008-2	DIN 18008-2, März 2006: Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 2: Linienförmig gelagerte Verglasungen. Deutsche Norm, Entwurf. Berlin: Beuth, 2006.
EN 572-1	DIN EN 572-1, September 2004: Glas im Bauwesen - Basiserzeugnisse aus Kalk-Natronglas - Teil 1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Erzeugnisse: Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2004.
EN 1464	DIN EN 1464, Januar 1995: Klebstoffe - Bestimmung des Schälwiderstandes von hochfesten Klebungen - Rollenschälversuch. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1995.
EN 1465	DIN EN 1465, Januar 1995: Klebstoffe - Bestimmung der Zugscherfestigkeit hochfester Überlappungsklebung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1995.
EN 1748-1-1	DIN EN 1748-1-1, Dezember 2004: Glas im Bauwesen - Spezielle Basiserzeugnisse - Borosilicatgläser - Teil 1-1: Definitionen und allgemeine physikalische und mechanische Eigenschaften. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2004.
EN 12600	DIN EN 12600, April 2003: Glas im Bauwesen - Pendelschlagversuch, Verfahren für die Stoßprüfung und Klassifizierung von Flachglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
EN 13022-1	E DIN EN 13022-1, April 2003: Glas im Bauwesen - Geklebte Verglasungen - Teil 1: Glasprodukte für SSG-Systeme - Tragende und nichttragende Ein- und Mehrfachverglasungen. Deutsche Norm, Entwurf. Berlin: Beuth, 2003.
EN 13022-2	E DIN EN 13022-2, April 2003: Glas im Bauwesen - Geklebte Verglasungen - Teil 2: Produktnorm für ultraviolettresistenten Dichtstoff und lastaufnehmenden Dichtstoff. Deutsche Norm, Entwurf. Berlin: Beuth, 2003.
EN 13022-3	E DIN EN 13022-3, Mai 2003: Glas im Bauwesen - Geklebte Verglasungen - Teil 3: Verglasungsvorschriften. Deutsche Norm, Entwurf. Berlin: Beuth, 2003.
EN 13887	DIN EN 13887, November 2003: Strukturklebstoffe - Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
EN 14869-1	DIN EN 14869-1, Oktober 2004: Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherverhaltens struktureller Klebungen - Teil 1: Torsionsprüfverfahren unter Verwendung stumpf verklebter Hohlzylinder (ISO 11003-1: 2001, modifiziert). Deutsche Norm. Berlin: Beuth 2004.

EN 14869-2	DIN EN 14869-2, Oktober 2004: Strukturklebstoffe - Bestimmung des Scherhaltens struktureller Klebungen - Teil 2: Scherprüfung für dicke Fügeteile (ISO 11003-2: 2001, modifiziert). Deutsche Norm. Berlin: Beuth 2004.
EN 15434	DIN EN 15434, August 2006: Glas im Bauwesen - Produktnorm für lastübertragende und/oder UV-beständige Dichtstoffe (für geklebte Verglasungen und/oder Isolierverglasungen mit exponierten Dichtungen). Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2006.
EN 26922	DIN EN 26922, Mai 1993: Klebstoffe - Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfklebungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1993.
EN 28510-2	DIN EN 28510-2, Mai 1993: Klebstoffe - Schälprüfung für flexibel/starr geklebte Proben - Teil 2: 180°-Schälversuch. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1993.
ISO 179-1	DIN EN ISO 179-1, Mai 2006: Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Nicht instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2006.
ISO 179-2	DIN EN ISO 179-2, Juni 2000: Kunststoffe - Bestimmung der Charpy-Schlageigenschaften - Teil 1: Instrumentierte Schlagzähigkeitsprüfung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
ISO 293	DIN EN ISO 293, Oktober 2005: Kunststoffe - Formgepresste Probekörper aus Thermoplasten. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2005.
ISO 294-1	DIN EN ISO 294-1, Oktober 1998.: Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Herstellung von Vielzweckprobekörpern und Stäben. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
ISO 294-2	DIN EN ISO 294-2, Mai 2006.: Spritzgießen von Probekörpern aus Thermoplasten - Teil 2: Kleine Zugstäbe. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2006.
ISO 527-1	DIN EN ISO 527-1, April 1996: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundsätze. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1996.
ISO 527-2	DIN EN ISO 527-2, Juli 1996: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 2: Form- und Extrusionswerkstoffe. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1996.
ISO 527-3	DIN EN ISO 527-3, Juli 2003: Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
ISO 3167	DIN EN ISO 3167, Dezember 2003: Kunststoffe - Vielzweckprüfkörper. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
ISO 6721-1	DIN EN ISO 6721-1, Januar 2003: Kunststoffe - Bestimmung dynamisch-mechanischer Eigenschaften - Teil 1: Allgemeine Grundlagen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2003.
ISO 9653	DIN EN ISO 9653, Oktober 2000: Prüfverfahren für die Schlagfestigkeit von Klebungen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2000.
ISO 10350-1	DIN EN ISO 10350-1, März 2001: Ermittlung und Darstellung vergleichbarer Einpunktkennwerte - Teil 1: Formmassen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2001.
ISO 10365	DIN EN ISO 10365, August 1995: Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1995.
ISO 12543-1	DIN ISO 12543-1, August 1998: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 1: Definitionen und Beschreibung von Bestandteilen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
ISO 12543-2	DIN ISO 12543-2, März 2006: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 2: Verbund-Sicherheitsglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2006.
ISO 12543-3	DIN ISO 12543-3, August 1998: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 3: Verbundglas. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.

ISO 12543-4	DIN ISO 12543-4, August 1998: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 4: Verfahren zur Prüfung der Beständigkeit. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
ISO 12543-5	DIN ISO 12543-5, August 1998: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 5: Maße und Kantenbearbeitung. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
ISO 12543-6	DIN ISO 12543-6, August 1998: Glas im Bauwesen - Verbundglas und Verbund-Sicherheitsglas - Teil 6: Aussehen. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 1998.
ISO 13445	DIN EN ISO 13445, September 2006: Klebstoffe - Bestimmung der Scherfestigkeit von Klebungen zwischen starren Werkstoffen nach dem Blockscherverfahren. Deutsche Norm. Berlin: Beuth, 2006.
BÜV 2002	BÜV-Empfehlung: Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen [TKB] - Entwurf, Bemessung und Konstruktion, Diskussionsentwurf des Bau-Überwachungsvereins e.V., Fassung Oktober 2002.
ETAG 002-1	ETAG Nr. 002/Teil 1; Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems - SSGS), Teil 1: Gestützte und ungestützte Systeme. Berlin: Bundesanzeiger 1999.
ETAG 002-2	ETAG Nr. 002/Teil 2; Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems - SSGS), Teil 2: Beschichtete Aluminium-Systeme. Berlin: Bundesanzeiger 2002.
ETAG 002-3	ETAG Nr. 002/Teil 3; Leitlinie für die europäische technische Zulassung für geklebte Glaskonstruktionen (Structural Sealant Glazing Systems - SSGS), Teil 3: Systeme mit thermisch getrennten Profilen. Berlin: Bundesanzeiger 2003.
TRAV 2003	Technische Regeln für die Verwendung von absturzsichernden Verglasungen. Fassung Januar 2003. In: Mitteilungen des deutschen Instituts für Bautechnik, Ausgabe März 2003. Berlin: DIBt, 2003.
TRLV 1998	Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen. Fassung September 1998. In: Mitteilungen des deutschen Instituts für Bautechnik, Ausgabe Dezember 1998. Berlin: DIBt, 1998.
TRLV 2006	Technische Regeln für die Verwendung von linienförmig gelagerten Verglasungen. Fassung August 2006. In: Mitteilungen des deutschen Instituts für Bautechnik, Ausgabe März 2007. Berlin: DIBt, 2007.
TRPV 2006	Technische Regeln für die Bemessung und Ausführung punktförmig gelagerter Verglasungen. Fassung August 2006. In: Mitteilungen des deutschen Instituts für Bautechnik, Ausgabe März 2007. Berlin: DIBt, 2007.

15.3 Produktdatenblätter

Delo 485	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® GB485, Landsberg 2007.
Delo 4468	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® 4468, Landsberg 2005.
Delo 55727	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® AD VE 55727, Landsberg 2005.
Delo 55779	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® AD VE 55779, Landsberg 2005.
Delo 56422	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® GB VE 56422, Landsberg 2006.
Delo 56903	DELO Industrie Klebstoffe: Technische Information DELO-PHOTOBOND® GB VE 56903, Landsberg 2007.
Huntsman 2020	Huntsman: Technische Information Araldite® 2020, Basel 2004.
3M 9323	3M: Technische Informationen Scotch Weld® 9323, Neuss 2002.

15.4 Internetadressen

CES 2008	http://www.silicones-europe.com vom 04.10.2008.
Cooper 2008	http://www.cooper.edu vom 09.10.2008.
DELO 2006	http://www.delo.de/cont/pdf/produkte/anwend_glas.pdf vom 02.12.2008.
LDA 2008	http://www.lda-lsa.de/landesmuseum_fuer_vorgeschichte/dauerausstellung/altsteinzeit/ vom 20.10.2008.
TU-Dresden 2008	http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/zentrale_einrichtungen/ua/navpoints/archiv/doku/ehrendok# vom 04.10.2008.
Goethe 2009	http://www.wissen-im-netz.info/literatur/goethe/ital/07/153.htm vom 03.09.2009.

16 Abbildungsnachweis

Bild 1	Birkenpech. Nach Bolus 2006, Tafel 10.
Bild 2	Strichzeichnung nach einer Darstellung auf einer Skulptur aus Theben. Nach Knight 1931, Seite 5.
Bild 3	Ausführungsvarianten für SSGS-Verglasungen nach ETAG 002-1. Nach Weller 2008, Seite 69.
Bild 5	Geklebte Glasträger. Nach Weller 2008, Seite 71.
Bild 6	Einteilung der Klebstoffe nach ihrem Aushärtemechanismus. Nach Habenicht 2006, Seite 6.
Bild 12	Prinzipskizze des Floatglasprozesses. Nach Weller 2008, Seite 12.
Bild 13	Oberflächenrauigkeit der Atmosphären- und Badseite von Floatglas. Nach Peters 2006, Seite 67.
Bild 14	Spektrale Durchlässigkeit von Floatglas. Nach Petzold 1990, Seite 56.
Bild 15	Lichttransmission und Reflexion in Abhängigkeit von Lichteinfallswinkel. Nach Petzold 1990, Seite 58.
Bild 16	richtige und falsche Stellung der Lampe. Nach Habenicht 2006, Seite 715.
Bild 26	Schematische Darstellung der Verformung einer einschnittigen Verbindung durch exzentrischen Lastangriff. Nach Schadow 2006, Seite 39.
Bild 27	Spannungsverteilung eines einschnittig überlappten Zugscherprüfkörpers. Nach Schadow 2006, Seite 39.
Bild 29	Schichten einer Klebverbindung. Nach Phung 2005, Seite 3.
Bild 30	Wärmeleitfähigkeitsbild am Übergang von Metall zu Epoxidharzklebstoff. Nach Kleinert 2001, Seite 14.
Bild 31	Ermittlung der Glasübergangstemperatur mit der Mikrothermischen Analyse. Nach Kleinert 2001, Seite 15.
Bild 32	Abhängigkeit des Elastizitätsmoduls von der Klebstoffdicke ermittelt nach LA-wave®. Nach IWS 2005, Seite 100.
Bild 42	Polymerketten, ungedehnt und gedehnt. Nach Roos 2005, Seite 282.
Bild 59	Schematischer Geräteaufbau einer dynamisch-mechanischen Analysators. Nach Netzsch 2007, Seite 2.
Bild 60	Schema einer Zughalterung einer dynamisch-mechanischen Analysators. Nach Netzsch 2007, Seite 13.
Bild 65	Rohrprobe. Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.
Bild 69	Rohrprobe mit aufgelegter Glasscheibe und Justiervorrichtung. Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.
Bild 70	Aushärten der Acrylatklebung. Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.
Bild 71	Schematische Darstellung der Rohrprobe. Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.
Bild 72	In die Prüfmaschine eingespannte Rohrprobe. Institut für Füge- und Schweißtechnik, TU Braunschweig.

Bild 110	Freibewitterungsstand. Nach Tasche 2007, Seite 89.
Bild 167	Versuchsanordnung mit dem Zwick Pendelschlagwerk 5113. DELO Industrie Klebstoffe
Bild 168	Pendelschlagwerk Zwick 5113 zur Ermittlung der Schlagzähigkeit einer geklebten Glas-Metall-Verbindung. DELO Industrie Klebstoffe
Bild 189	Statische bestimmt Lagerung in Scheibenebene. Nach Weller 2008, Seite 66.
Bild 190	Locking Solid185. Nach CADFEM 2005.

Die restlichen Bilder stammen aus dem Archiv des Autors.

17 Bezeichnungen

17.1 Formelzeichen

Lateinische Buchstaben

A	Fläche
A_0	Fläche zu Beginn der Messung
a_n	Schlagzähigkeit
A_n	Schlagarbeit
b_K	Breite der Klebstofffuge
d	Glasscheibendicke
d_a	Außendurchmesser Stahlrohr
$d_{a,Glas}$	Außendurchmesser Glasscheibe
d_i	Innendurchmesser Stahlrohr
$d_{i,Glas}$	Innendurchmesser Glasscheibe
d_K	Dicke der Klebstofffuge
d^*	Ersatzdicke
E	Elastizitätsmodul des Klebstoffes
E^*	Komplexer Modul aus der dynamisch-mechanischen Analyse beziehungsweise Proportionalitätsfaktor bei der Auswertung der Rohrprobe
E_{Glas}	Elastizitätsmodul Glas
E_{Stahl}	Elastizitätsmodul Stahl
E'	Speichermodul aus der dynamisch-mechanischen Analyse
E''	Verlustmodul aus der dynamisch-mechanischen Analyse
F	Kraftgröße
F_x	Kraft in x-Richtung
$f_{ESG,k}$	Charakteristische Mindestbiegezugfestigkeit von ESG
$f_{Float,k}$	Charakteristische Mindestbiegezugfestigkeit von Float
$f_{TVG,k}$	Charakteristische Mindestbiegezugfestigkeit von TVG
g	Erdbeschleunigung
G	Schubmodul des Klebstoffs
G_{Glas}	Schubmodul Glas
G_{Stahl}	Schubmodul Stahl
h	Fallhöhe
k_1	Abminderungsfaktor bei Temperaturbeanspruchung
k_2	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Alterung
k_3	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Kriechneigung
k_4	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der reduzierten Produktionsqualität
k_5	Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Schwankungen von Materialeigenschaften
k_{ges}	Abminderungsfaktor gesamt
L_0	Undeformierte Ausgangslänge oder Messlänge

l	Länge
l_{Ges}	Gesamte Messlänge
l_{Glas}	Messlänge im Fügeteil aus Glas
l_K	Länge der Klebfuge
l_{Stahl}	Messlänge im Fügeteil aus Stahl
l_0	Überlappungslänge
M	Moment
M_t	Torsionsmoment
q	Belastung
r	Radius
r_a	Außenradius Stahlrohr
r_i	Innenradius Stahlrohr
$R_{u,5}$	Charakteristische Bruchspannung
s	Standardabweichung
t	Zeit
T	Temperatur
T_g	Glasübergangstemperatur
u_{Ges}	Gesamtverschiebung in Umfangsrichtung
u_{Glas}	Verschiebung des Fügeteils aus Glas in Umfangsrichtung
u_K	Verschiebung der Klebschicht in Umfangsrichtung
u_{Stahl}	Verschiebung des Fügeteils aus Stahl in Umfangsrichtung
v	Geschwindigkeit
v_{Ges}	Gesamtverformung in Längsrichtung
v_{Glas}	Verformung des Fügeteils aus Glas in Längsrichtung
v_K	Verformung der Klebschicht in Längsrichtung
v_{Stahl}	Verformung des Fügeteils aus Stahl in Längsrichtung
W_p	Torsionswiderstandsmoment oder polares Widerstandsmoment
x_M	Mittelwert

Griechische Buchstaben

α	Benetzungswinkel
α_T	Wärmeausdehnungskoeffizient
δ	Phasenverschiebung aus der dynamisch-mechanischen Analyse
$\tan \delta$	Verlustfaktor aus der dynamisch-mechanischen Analyse
ε_1	Dehnung bei 0,05 % beziehungsweise Hauptdehnung
ε_2	Dehnung bei 0,25 %
ε_a	axiale Dehnung
ε_K	Dehnung in der Klebschicht
$\varepsilon_{\text{längs}}$	Dehnung in Längsrichtung
$\varepsilon_{\text{quer}}$	Dehnung in Querrichtung
ε_t	transversale Dehnung
ε_w	wahre Dehnung
ε_x	Dehnung in x-Richtung
ε_y	Dehnung in y-Richtung
ε_z	Dehnung in z-Richtung
γ	Gleitung der Klebstoffuge
γ_1	Winkel der Verformung im Innern der Klebfuge
γ_2	Winkel der Verformung im Randbereich der Klebfuge
γ_{xy}	Gleitung in xy-Ebene
γ_{xz}	Gleitung in xz-Ebene
γ_{yz}	Gleitung in yz-Ebene

ν	Querdehnzahl
σ	Zugspannung
σ_1	Spannungswert gemessen bei einer Dehnung von ε_1 beziehungsweise Hauptspannung
σ_2	Spannungswert gemessen bei einer Dehnung von ε_2
σ_{Glas}	Zugspannung im Glas (bei Rohrprobe)
σ_w	wahre Spannung
σ_x	Spannung in x-Richtung
σ_y	Spannung in y-Richtung
σ_z	Spannung in z-Richtung
τ	Schubspannung
$\tau_{a\beta}$	Exzentrizität von 5 % mit 75 % -iger Wahrscheinlichkeit
τ_{xy}	Schubspannung in xy-Ebene
τ_{xz}	Schubspannung in xz-Ebene
τ_{yz}	Schubspannung in yz-Ebene
τ_{Glas}	Schubspannung im Glas (bei Rohrprobe)
τ_m	mittlere Schubspannung
τ_{max}	maximale Schubspannung am Überlappungsende

17.2 Abkürzungen

A1	Auftreffstelle Mitte
A2	Auftreffstelle Mitte oben
A3	Auftreffstelle am Beschlag
AF23	Anfangsfestigkeit bei +23 °C
DMA	Dynamisch-mechanische Analyse
DMS	Dehnmessstreifen
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
ESG	Einscheiben-Sicherheitsglas
ESG-H	Heißgelagertes Einscheiben-Sicherheitsglas
FE	Finite Elemente
LED	Light Emitting Diode
PEEK	Polyetheretherketon
PET	Polyethylenterephthalat
POM	Polyoxymethylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVB	Polyvinylbutyral
RF	Restfestigkeit
RF80	Restfestigkeit bei +80 °C
SSGS	Structural-Sealant-Glazing-System
TVG	Teilvorgespanntes Glas
UV	Ultraviolettstrahlung (100 bis 380 nm)
UVA	Ultraviolettstrahlung (315 bis 380 nm)
UVB	Ultraviolettstrahlung (280 bis 315 nm)
UVC	Ultraviolettstrahlung (100 bis 280 nm)
VG	Verbundglas
VSG	Verbund-Sicherheitsglas
W1	Wegaufnehmer 1
W2	Wegaufnehmer 2

Anhang

Photobond 4468 _ +23 °C _ 1 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	1 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.6	10,05	4,11	287,8	7,8	Nach 130 min abgebrochen
1.17	10,2	4,55	325,2	6,7	Nach 55 min abgebrochen
1.22	10,0	4,32	299,0	6,1	Nach 80 min abgebrochen
1.31	10,0	4,02	-	-	Nur Anfangsbereich
1.32	10,0	4,15	-	-	Nur Anfangsbereich

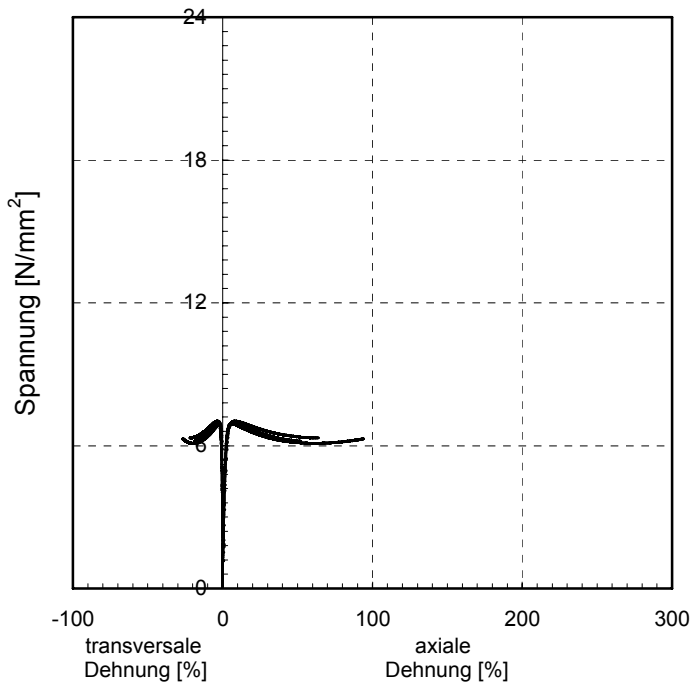


Bild A1 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 1 mm/min.

Photobond 4468 _ +23 °C _ 5 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	5 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.18	9,9	4,15	464,8	203,4	Anschlag erreicht
1.19	10,0	4,14	445,1	204,6	Anschlag erreicht
1.20	10,25	4,25	511,2	201,8	Anschlag erreicht
1.21	10,0	3,92	471,4	202,9	Anschlag erreicht
1.25	10,25	4,40	478,8	193,9	Anschlag erreicht

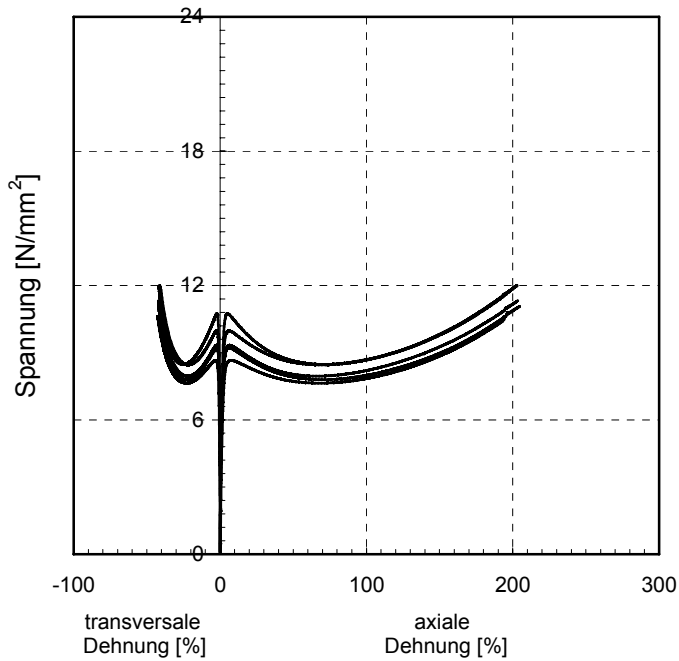


Bild A2 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 5 mm/min.

Photobond 4468 _ +23 °C _ 20 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	20 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.1	10,0	3,96	573,6	218,6	Anschlag erreicht
1.2	10,0	3,78	545,8	215,7	Anschlag erreicht
1.3	10,15	3,80	549,1	5,0	Anschlag erreicht
1.4	10,0	4,03	606,7	221,4	Bruch
1.5	10,05	3,95	590,2	220,4	Anschlag erreicht

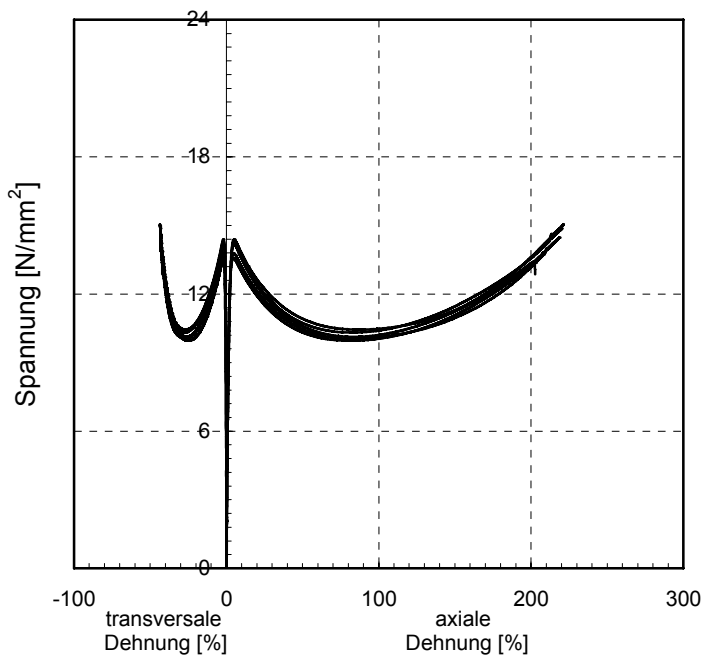


Bild A3 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 20mm/min.

Photobond 4468 _ +23 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.7	10,0	4,00	613,4	5,2	Anschlag erreicht
1.8	10,1	4,06	519,1	5,3	Anschlag erreicht
1.9	10,05	4,15	689,3	4,9	Anschlag erreicht
1.10	10,0	4,15	629,6	5,3	Anschlag erreicht
1.11	10,0	4,23	648,4	5,1	Anschlag erreicht

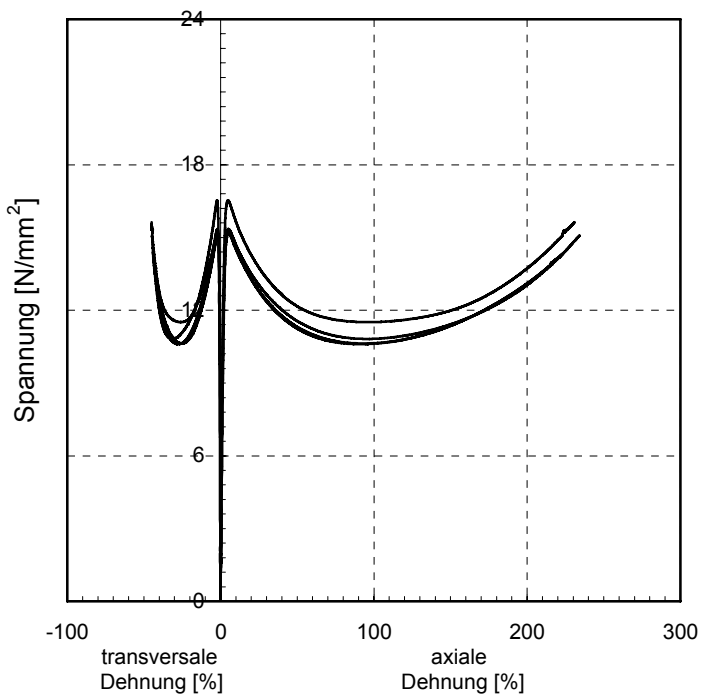


Bild A4 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 50mm/min.

Photobond 4468 _ +23 °C _ 100 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	100 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.12	10,0	3,95	652,2	4,8	Bruch
1.13	10,15	4,55	812,7	5,0	Anschlag erreicht
1.14	10,0	4,00	665,2	6,0	Bruch
1.15	10,0	3,97	718,3	5,3	Anschlag erreicht
1.16	10,1	4,55	835,1	4,6	Anschlag erreicht

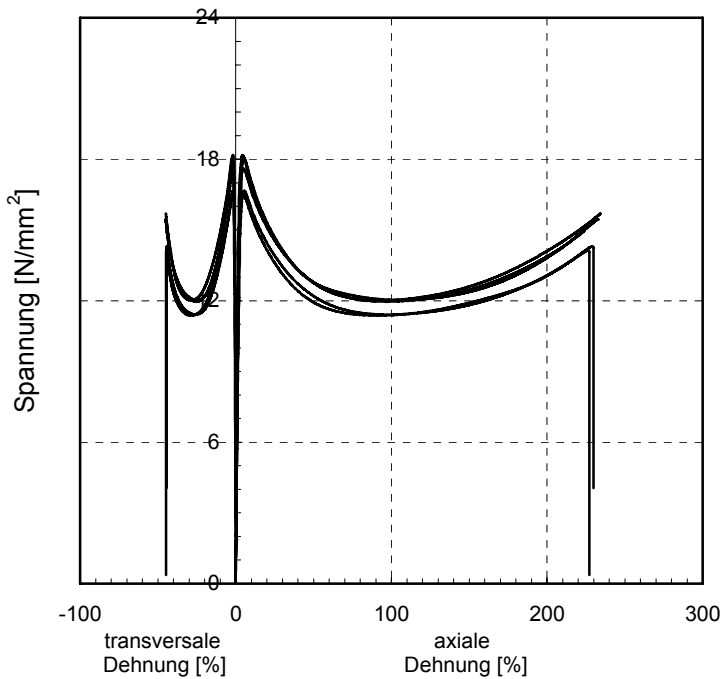


Bild A5 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 100mm/min.

Photobond 4468 _ +23 °C _ 200 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	200 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.26	9,95	4,17	779,3	5,3	Bruch
1.27	9,95	3,97	701,9	5,3	Anschlag erreicht
1.30	10,0	4,02	734,2	5,0	Bruch

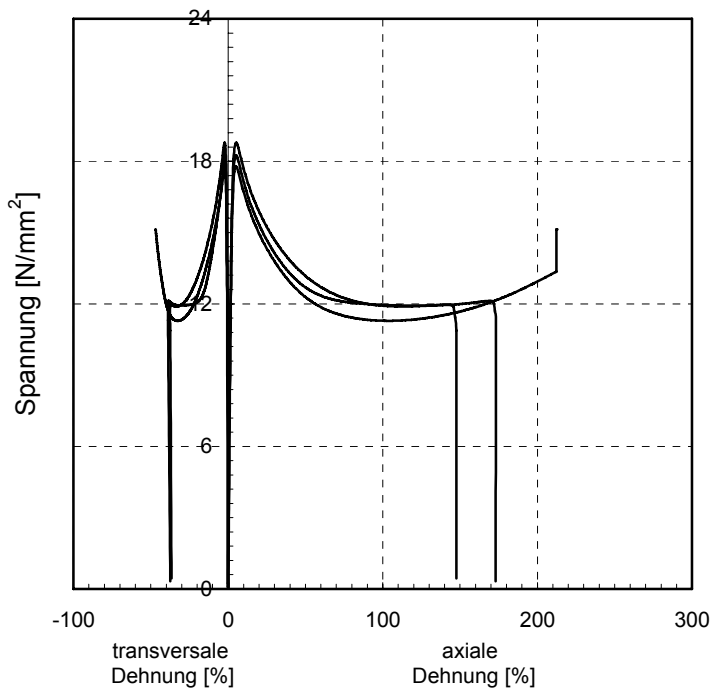


Bild A6 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 200mm/min.

Photobond 4468 _ +23 °C _ 500 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	500 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1.28	9,9	4,05	807,6	5,9	Bruch
1.29	10,15	4,37	951,5	5,9	Bruch

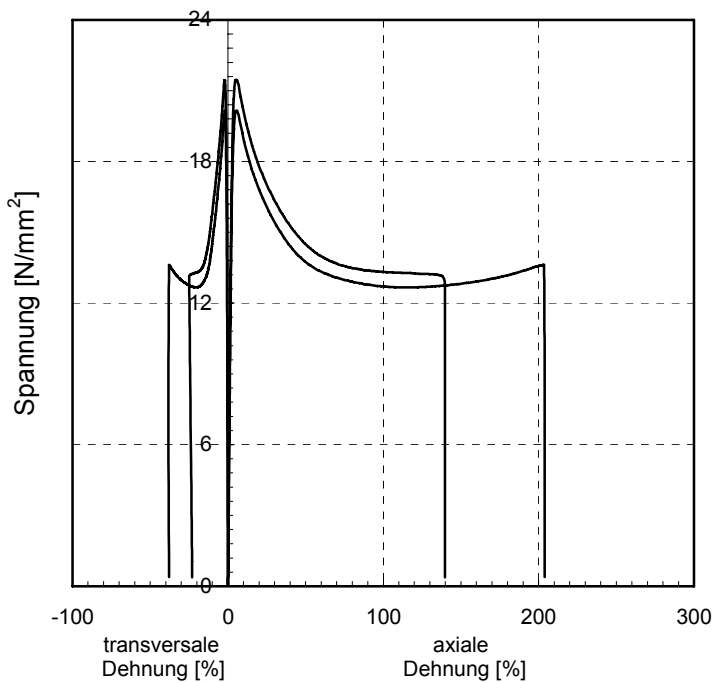


Bild A7 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 500mm/min.

Photobond 4468 _ +80 °C _ 1 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	1 Tag
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	1 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
4.4	10,0	4,41	13,5	50,4	Bis 50 % Dehnung
4.5	9,97	4,32	15,2	60,0	Bis 50 % Dehnung
4.6	9,99	4,38	15,2	50,2	Bis 50 % Dehnung
4.7	9,98	4,21	-	-	Nur Anfangsbereich
4.8	9,99	4,33	-	-	Nur Anfangsbereich

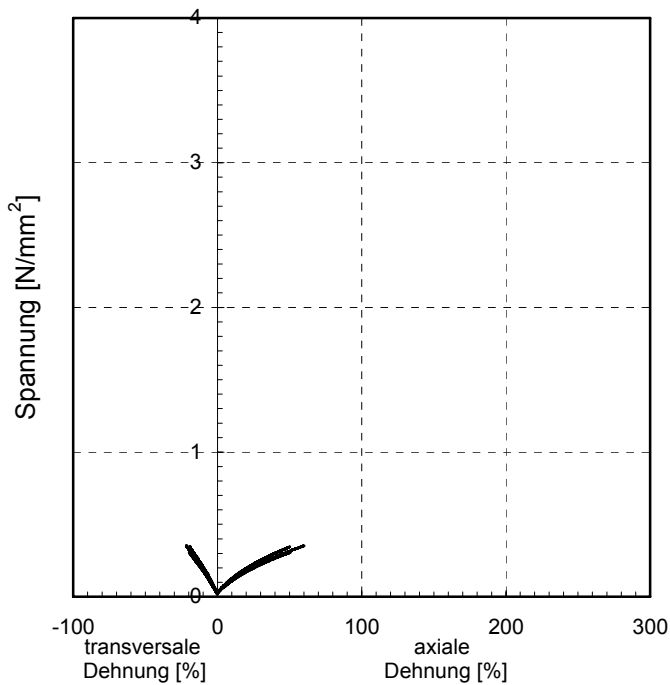


Bild A8 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +80 °C, 1 mm/min.

Photobond 4468 _ +80 °C _ 50 mm/min _ 3 Tage

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	72 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.1	10,14	4,27	52,2	188,2	Anschlag erreicht
2.2	9,93	3,95	49,1	181,1	Anschlag erreicht
2.3	9,85	4,08	50,5	171,6	Anschlag erreicht
2.4	10,18	3,98	49,3	186,4	Anschlag erreicht
2.5	10,05	4,45	53,2	167,3	Anschlag erreicht

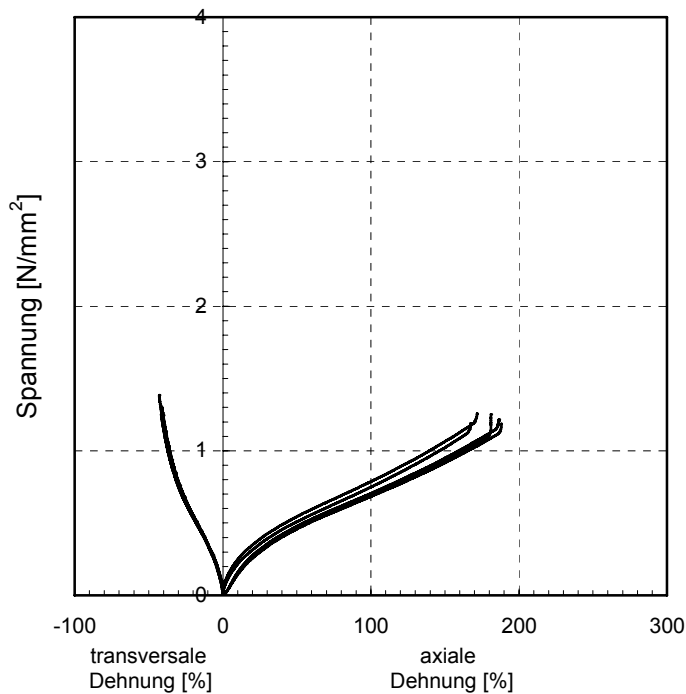


Bild A9 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +80 °C, 50 mm/min. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlich langer Einlagerungsdauer wurden diese Prüfkörper 3 Tage bei +80 °C eingelagert.

Photobond 4468 _ +80 °C _ 50 mm/min _ 1 Tag

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.6	10,05	4,45	49,1	199,5	Anschlag erreicht
2.7	9,97	4,00	45,1	184,7	Anschlag erreicht
2.8	10,06	4,23	50,0	195,5	Anschlag erreicht
2.9	9,89	4,15	49,1	184,3	Anschlag erreicht
2.10	9,89	4,05	46,4	191,8	Anschlag erreicht

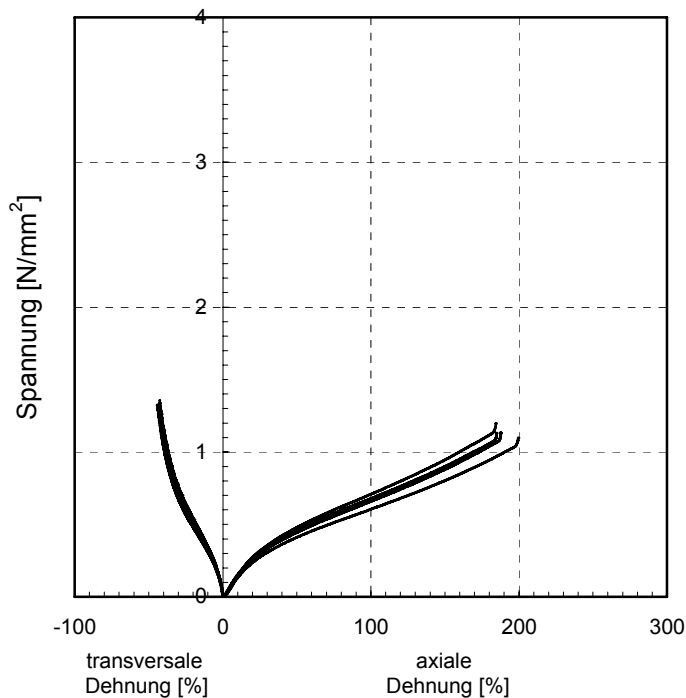


Bild A10 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +80 °C, 50 mm/min. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlich langer Einlagerungsdauer wurden diese Prüfkörper 1 Tag bei +80 °C eingelagert.

Photobond 4468 _ +80 °C _ 50 mm/min _ 1 Stunde

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	1 h - 3 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.11	10,03	4,23	74,1	173,0	Temperatur abgefallen.
2.12	9,87	4,45	34,8	136,9	Klemmbacken lösten sich
2.13	9,91	4,23	10,7	23,0	Messung ausgefallen
2.14	9,87	4,18	46,9	182,7	Anschlag erreicht
2.15	9,94	4,02	46,6	189,9	Anschlag erreicht

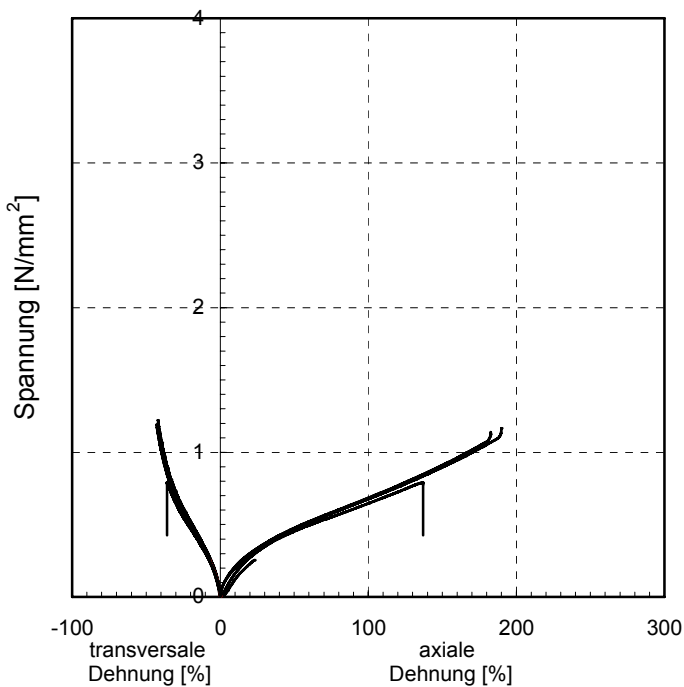


Bild A11 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +80 °C, 50 mm/min. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlich langer Einlagerungsdauer wurden diese Prüfkörper 1 Stunde bei +80 °C eingelagert.

Photobond 4468 _ +80 °C _ 500 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	500 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
4.9	9,98	4,37	63,7	141,2	Anschlag erreicht
4.10	9,88	4,43	62,7	139,3	Anschlag erreicht
4.11	9,96	4,30	64,2	143,8	Anschlag erreicht

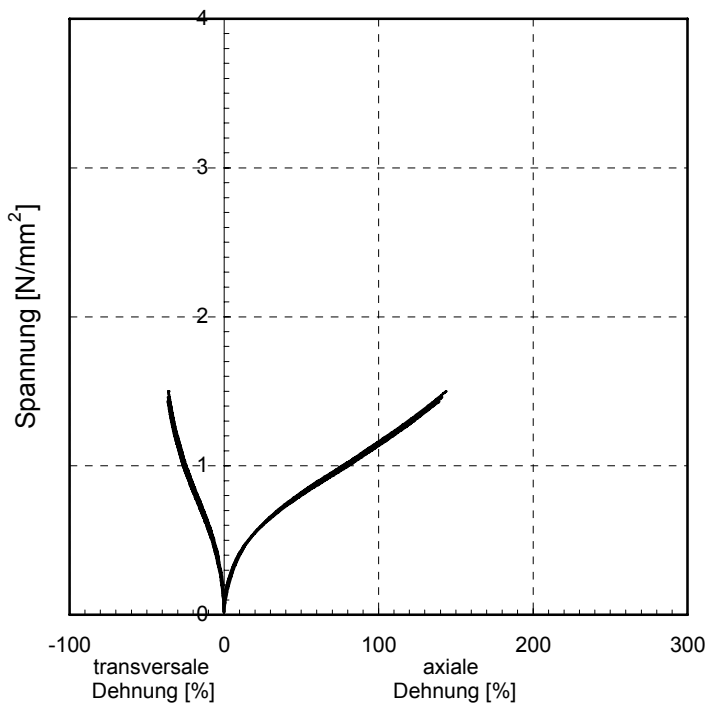


Bild A12 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +80 °C, 500 mm/min.

Photobond 4468 _ -20 °C _ 1 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	1 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
4.12	9,95	4,49	889,7	1,1	Bruch
4.13	9,96	4,40	847,7	1,0	Bruch
4.14	9,92	4,41	1282,2	1,8	Bruch
4.15	9,91	4,31	1276,3	1,6	Bruch
4.16	9,93	4,75	780,2	1,0	Bruch

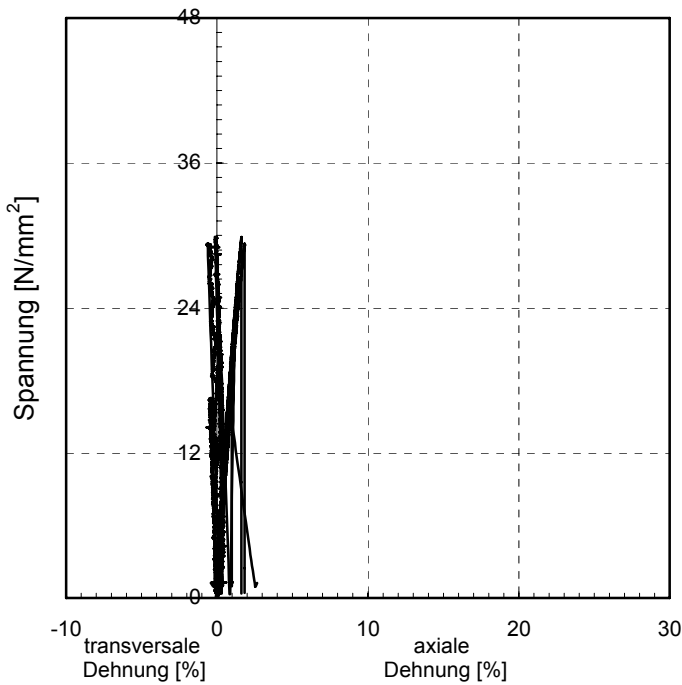


Bild A13 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, -20 °C,

Photobond 4468 _ -20 °C _ 50 mm/min _ 3 Tage

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	72 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.16	9,66	4,04	1676,1	2,3	Bruch
2.17	9,95	4,05	1448,2	1,9	Bruch
2.18	9,82	3,90	1572,4	2,0	Bruch
2.19	9,90	3,98	1706,5	2,4	Bruch
2.20	9,98	3,80	869,0	1,0	Bruch

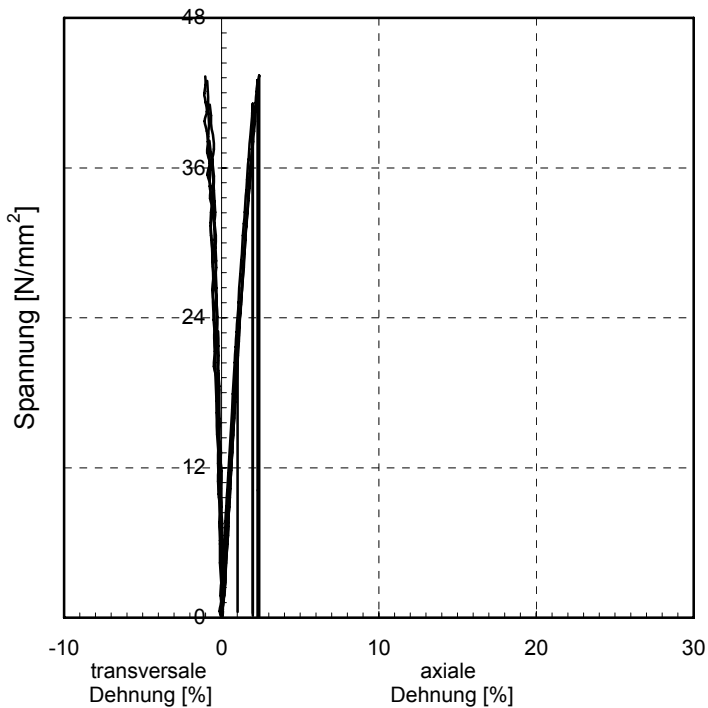


Bild A14 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, -20 °C, 50 mm/min. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlich langer Einlagerungsdauer wurden diese Prüfkörper 3 Tage bei -20 °C eingelagert.

Photobond 4468 _ -20 °C _ 50 mm/min _ 1 Tag

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.21	9,87	3,98	919,3	1,2	Bruch
2.22	9,85	4,04	1121,1	1,5	Bruch
2.23	9,88	3,93	1552,8	2,5	Bruch
2.24	9,88	4,10	1143,7	1,5	Bruch
2.25	10,05	3,88	1148,0	1,5	Bruch

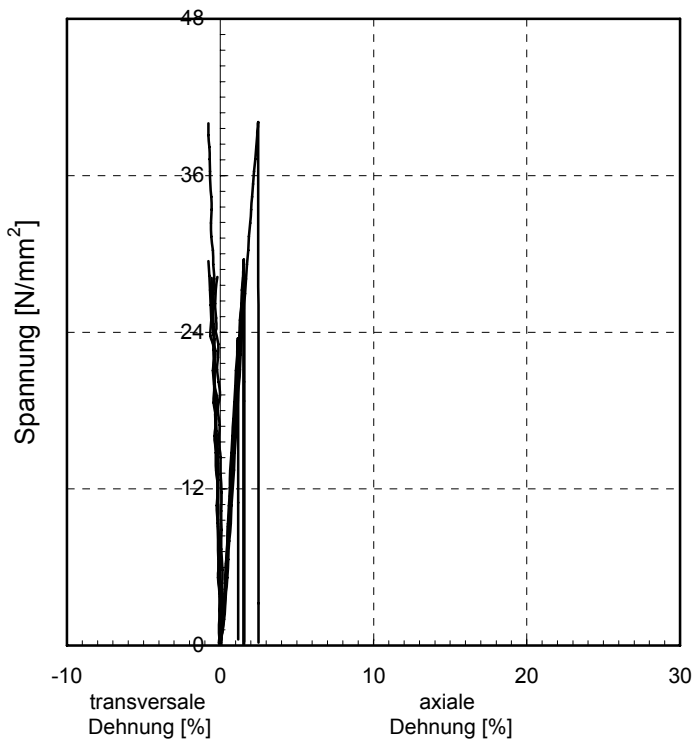


Bild A15 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, -20 °C, 50 mm/min. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlich langer Einlagerungsdauer wurden diese Prüfkörper 1 Tag bei -20 °C eingelagert.

Photobond 4468 _ -20 °C _ 50 mm/min _ 1 Stunde

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	1 h - 3 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.26	10,02	3,85	1370,4	1,8	Bruch
2.27	9,66	4,07	1468,7	2,0	Bruch
2.28	9,69	4,00	1168,1	1,5	Bruch
2.29	9,82	4,00	919,4	1,1	Bruch
2.30	9,87	4,25	1271,8	1,5	Bruch

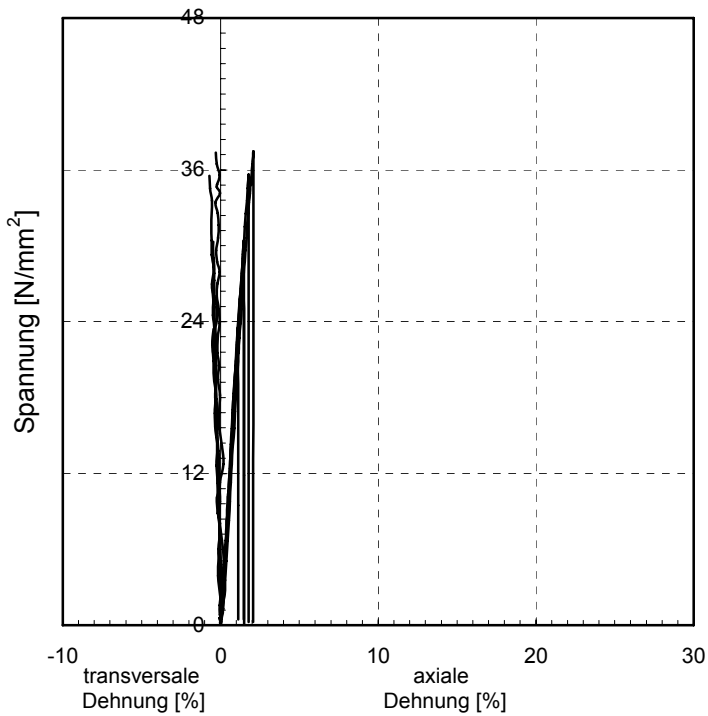


Bild A16 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, -20 °C, 50 mm/min. Zur Untersuchung der Auswirkung unterschiedlich langer Einlagerungsdauer wurden diese Prüfkörper 1 Stunde bei -20 °C eingelagert.

Photobond 4468 _ -20 °C _ 500 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	500 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
4.17	9,99	4,67	1853,9	1,6	Bruch
4.18	9,99	4,49	1792,5	1,6	Bruch
4.19	9,92	4,34	1542,3	1,3	Bruch

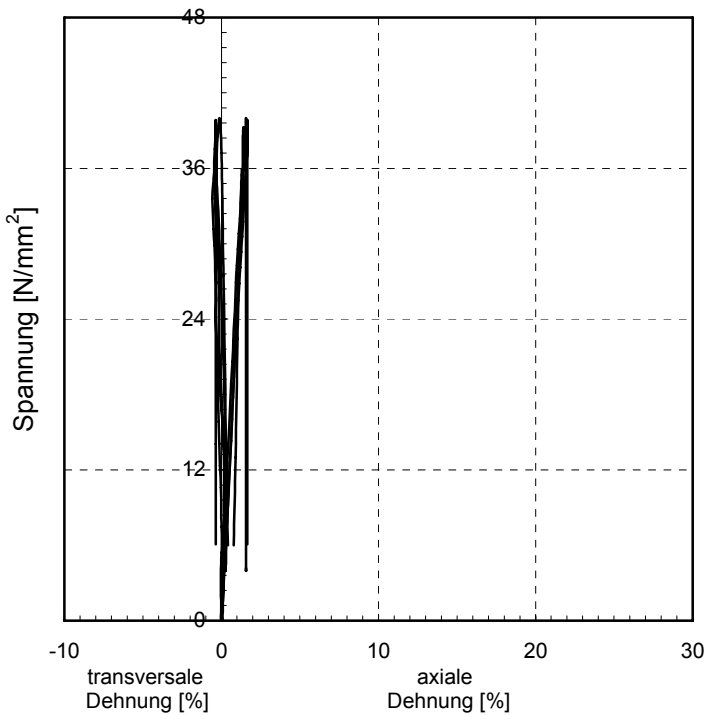


Bild A17 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, -20 °C, 500 mm/min.

Photobond 4468 _ ± 0 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	± 0 °C
Einlagerungsdauer	24 h \pm 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.46	9,92	4,12	1198,7	2,4	Bruch
2.47	10,10	4,20	1250,1	2,2	Bruch
2.48	9,99	3,98	1188,4	2,1	Bruch
2.49	9,90	3,98	1463,9	3,1	Bruch
2.50	9,87	4,17	1244,6	2,3	Bruch

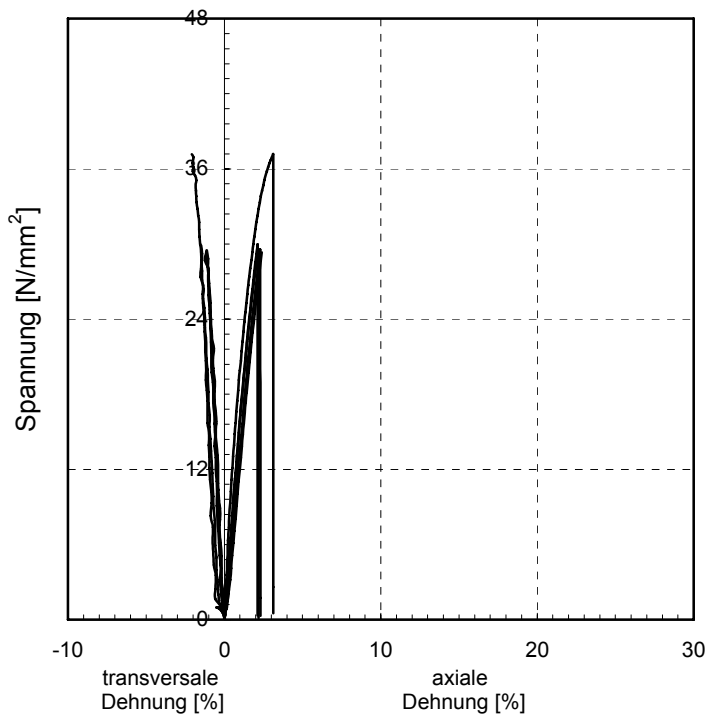


Bild A18 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, ± 0 °C, 50 mm/min.

Photobond 4468 _ +40 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+40 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.31	9,90	4,10	213,1	164,6	Anschlag erreicht
2.32	10,07	4,30	256,4	171,2	Anschlag erreicht
2.33	9,88	3,90	227,8	165,8	Anschlag erreicht
2.34	9,86	4,05	219,2	158,3	Anschlag erreicht
2.35	9,87	4,07	235,0	161,9	Anschlag erreicht

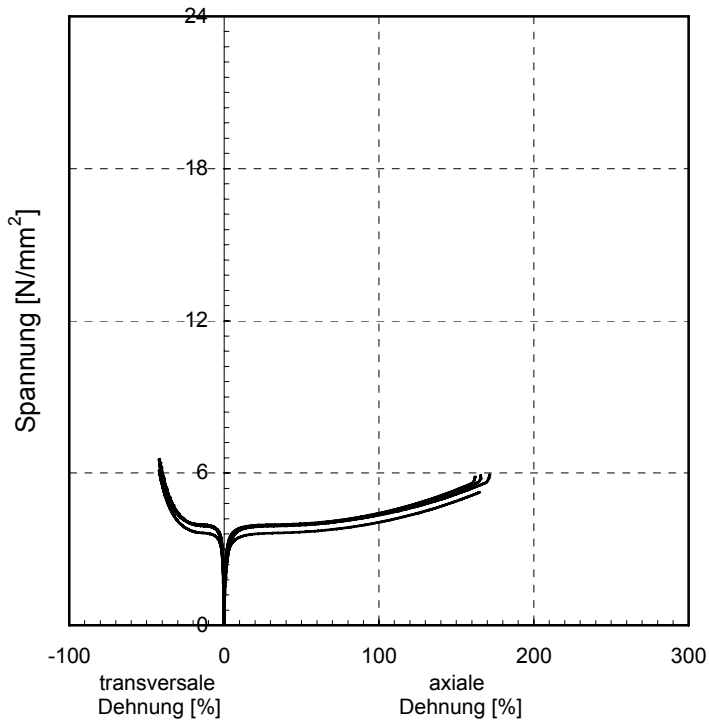


Bild A19 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +40 °C, 50 mm/min.

Photobond 4468 _ +60 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+60 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.36	9,83	4,10	70,7	158,1	Anschlag erreicht
2.37	10,04	3,73	67,7	159,3	Anschlag erreicht
2.38	10,02	3,85	64,1	162,7	Anschlag erreicht
2.39	9,75	4,07	68,8	161,2	Anschlag erreicht
2.40	10,06	3,60	59,9	162,1	Anschlag erreicht

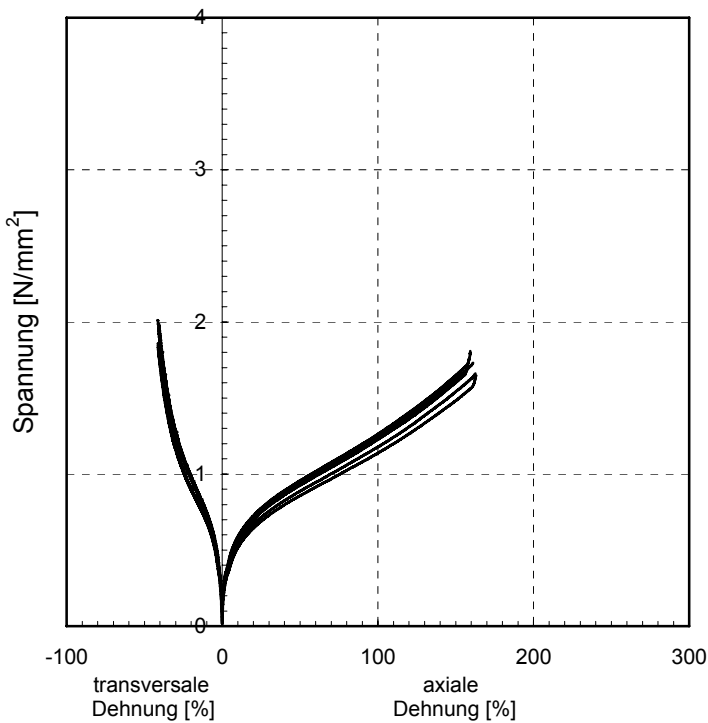


Bild A20 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +60 °C, 50 mm/min.

Photobond 4468 _ +70 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond 4468
Probenart	Typ 1B
Temperatur	+70 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probenbezeichnung	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
2.41	10,07	4,12	47,5	155,2	Anschlag erreicht
2.42	9,89	4,02	48,7	152,2	Anschlag erreicht
2.43	9,79	3,90	44,0	158,2	Anschlag erreicht
2.44	9,87	4,07	46,6	159,6	Anschlag erreicht
2.45	9,98	4,00	47,7	156,8	Anschlag erreicht

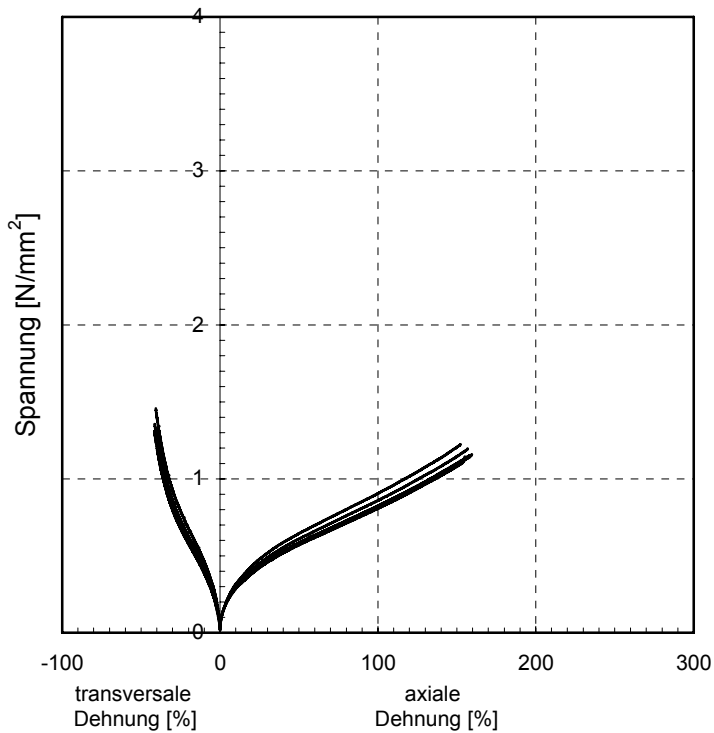


Bild A21 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +70 °C, 50 mm/min.

Photobond GB485 _ +23 °C _ 1 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	1 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
1	9,94	4,80	274,9	27,5	Bis 30 % Dehnung
2	10,11	4,71	274,5	26,9	Bis 30 % Dehnung
3	9,98	4,81	253,2	23,4	Bis 30 % Dehnung
4	9,96	4,70	262,5	24,9	Bis 30 % Dehnung
5	9,92	4,89	294,5	36,6	Bis 30 % Dehnung

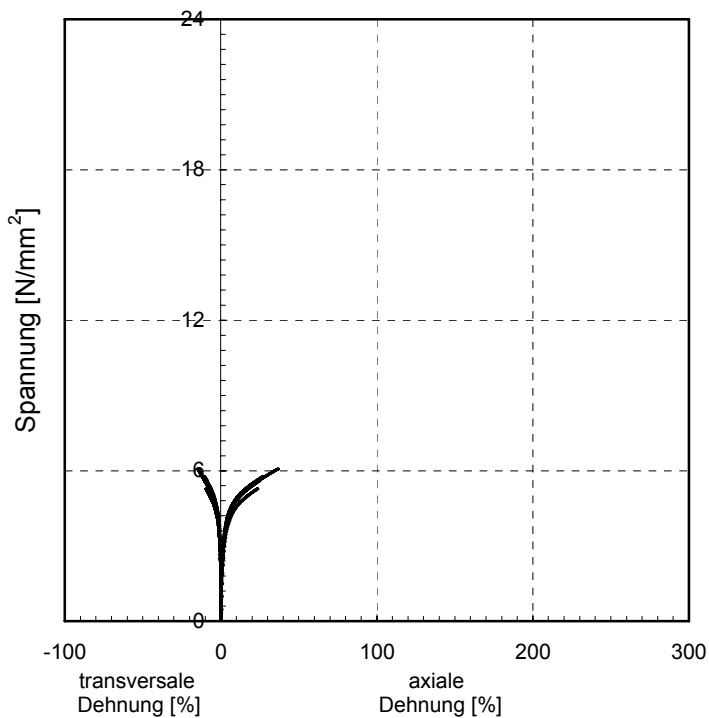


Bild A22 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, +23 °C, 1 mm/min.

Photobond GB485 _ +23 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Proben	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
6	10,01	4,59	688,4	144,7	Anschlag erreicht
7	9,97	4,79	703,3	143,1	Anschlag erreicht
8	9,83	5,13	731,9	142,7	Anschlag erreicht

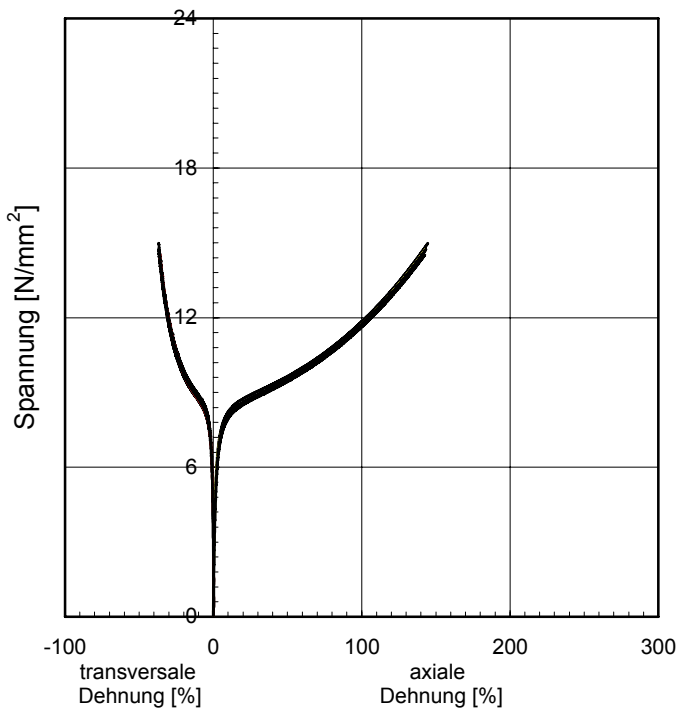


Bild A23 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, +23 °C, 50 mm/min.

Photobond GB485 _ +23 °C _ 500 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	+23 °C
Prüfgeschwindigkeit	500 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
9	10,0	4,57	780,8	147,5	Anschlag erreicht
10	9,90	4,67	780,2	151,7	Anschlag erreicht
11	9,94	4,92	829,7	150,2	Anschlag erreicht

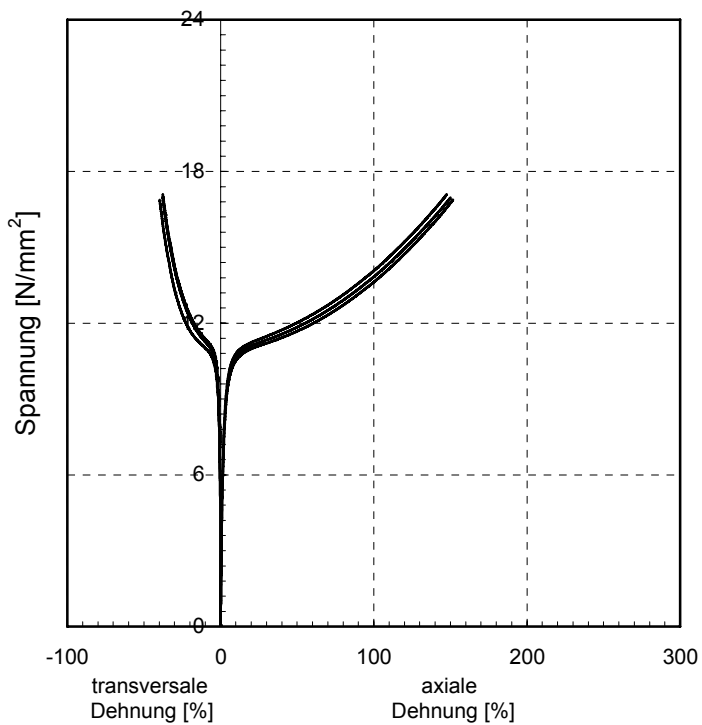


Bild A24 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, +23 °C, 500 mm/min.

Photobond GB485 _ +80 °C _ 1 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	1 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
12	9,99	5,09	99,4	50,2	Bis 50 % Dehnung
13	9,91	5,04	94,3	47,1	Bis 50 % Dehnung
14	9,94	4,52	42,8	10,1	Bis 10 % Dehnung
15	9,86	4,87	45,5	10,9	Bis 10 % Dehnung
16	9,92	4,70	42,9	10,1	Bis 10 % Dehnung

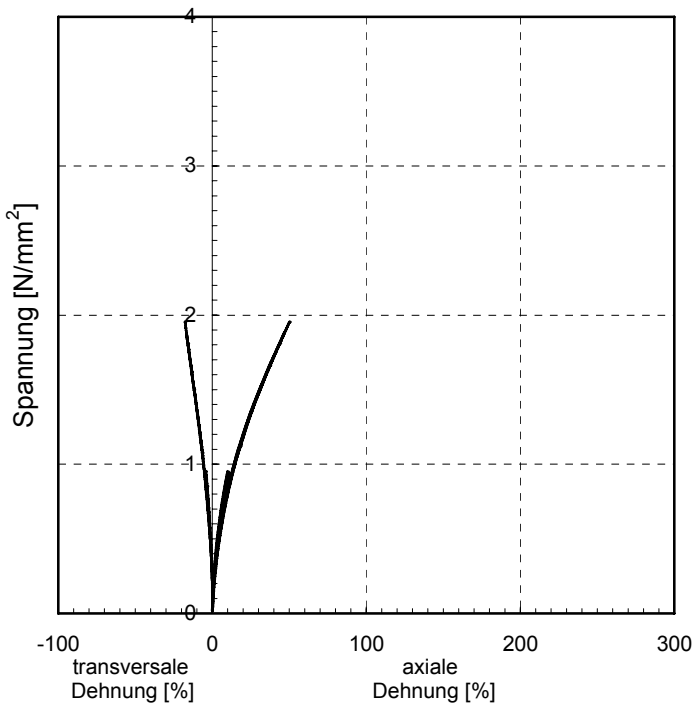


Bild A25 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, +80 °C, 1 mm/min.

Photobond GB485 _ +80 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
17	9,94	4,70	226,0	131,3	Anschlag erreicht
18	9,97	4,67	222,6	125,0	Bruch
19	9,94	4,92	238,4	127,2	Anschlag erreicht

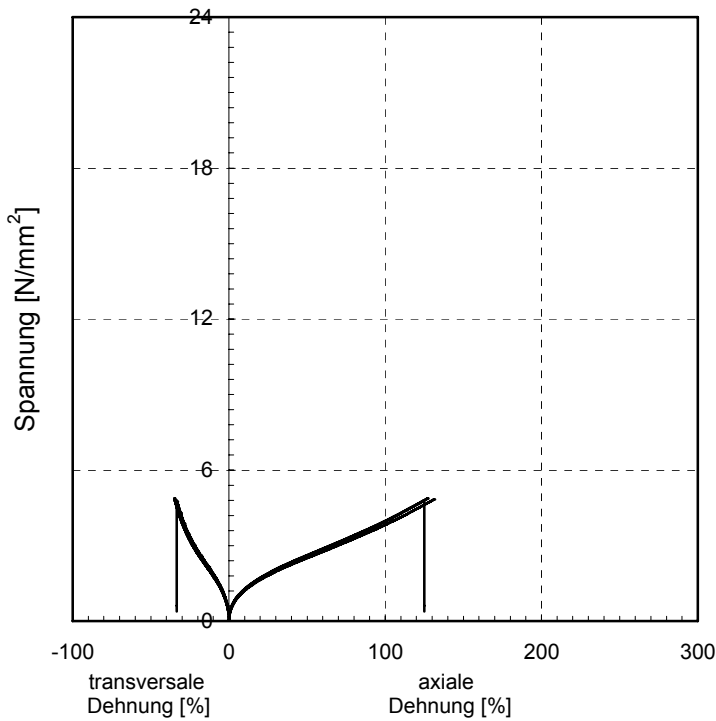


Bild A26 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, +80 °C, 50 mm/min.

Photobond GB485 _ +80 °C _ 500 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	+80 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	500 mm/min
Vorkraft	1 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
20	9,96	4,81	278,1	134,9	Anschlag erreicht
21	9,88	4,71	261,0	131,6	Anschlag erreicht
22	9,94	4,82	267,5	132,3	Anschlag erreicht

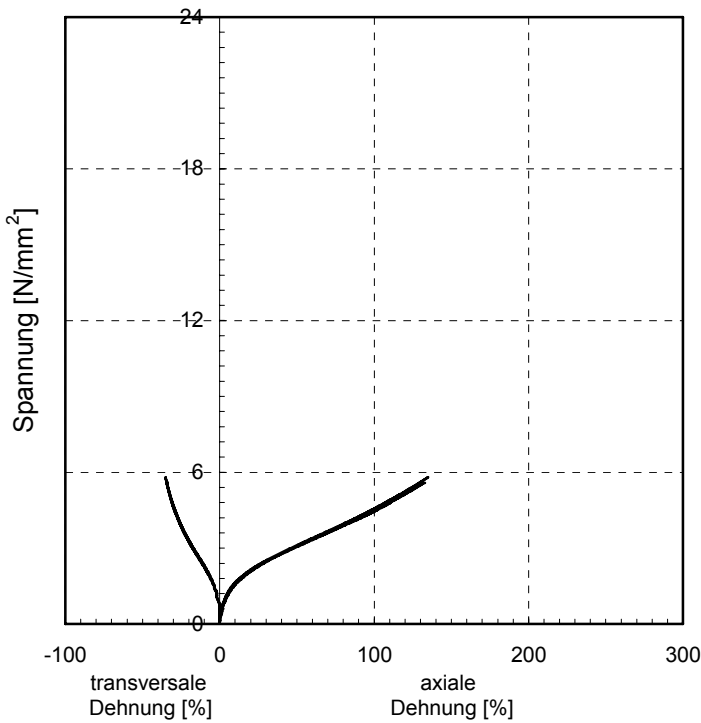


Bild A27 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, +80 °C, 500 mm/min.

Photobond GB485 _ -20 °C _ 1 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	1 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	1 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
23	9,82	4,70	1040,1	18,0	Messung ausgefallen
24	9,91	4,64	1038,7	21,5	Messung gestoppt
25	9,86	4,90	1046,1	33,4	Messung gestoppt
26	9,93	4,69	1074,1	28,4	Messung gestoppt
27	9,91	4,70	1107,6	45,8	Messung gestoppt

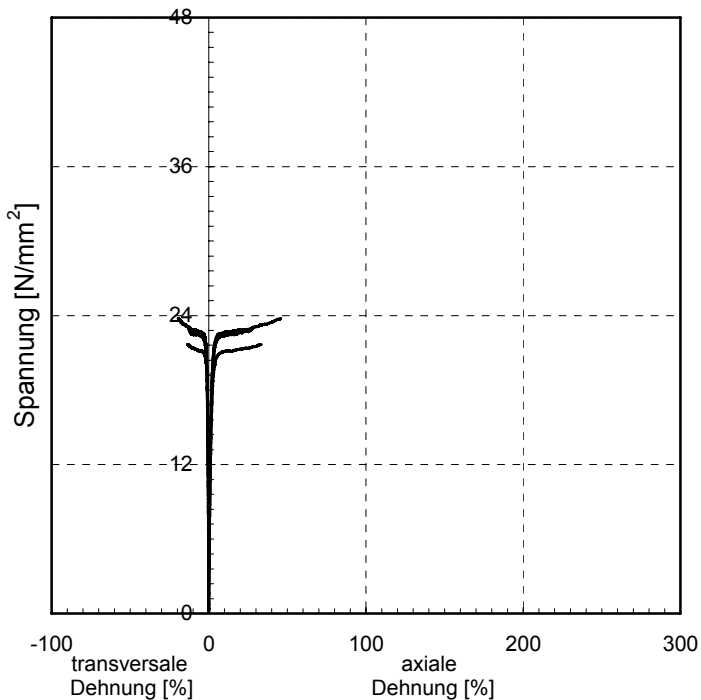


Bild A28 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, -20 °C, 1 mm/min.

Photobond GB485 _ -20 °C _ 50 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	50 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
28	9,92	5,01	1346,5	81,1	Bruch
29	9,87	4,77	1537,1	125,7	Bruch
30	9,82	4,70	1339,2	78,9	Bruch

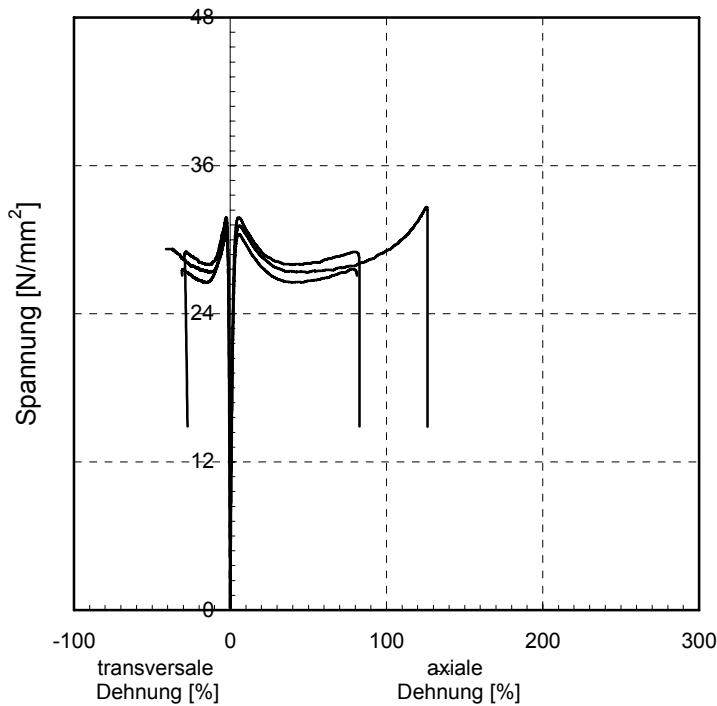


Bild A29 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, -20 °C, 50 mm/min.

Photobond GB485 _ -20 °C _ 500 mm/min

Klebstoff	Photobond GB485
Probenart	Typ 1A
Temperatur	-20 °C
Einlagerungsdauer	24 h ± 4 h
Prüfgeschwindigkeit	500 mm/min
Vorkraft	3 N
Vorkraftgeschwindigkeit	5 mm/min

Probe	Gemittelte Breite	Gemittelte Dicke	Maximale Last	Zugehörige axiale Dehnung	Bemerkungen
	[mm]	[mm]	[N]	[%]	
31	9,91	4,72	1781,9	6,0	Bruch
32	9,88	4,84	1791,9	6,2	Bruch
33	9,89	4,69	1801,2	5,5	Bruch

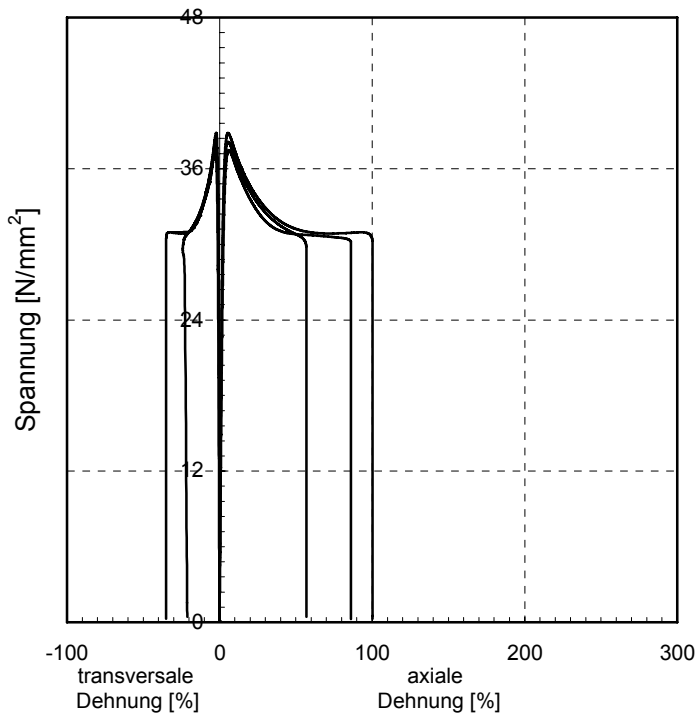


Bild A30 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond GB485, -20 °C, 500 mm/min.

Gegenüberstellung nomineller und tatsächlicher Werte

Für Photobond 4468_+23 °C_50 mm/min

Nominelle Spannung:

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Gleichung A1

Nominelle Dehnung

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Gleichung A2

Cauchy-Spannung:

$$\sigma_w = \frac{F}{A_0} \cdot (1 + \varepsilon)$$

Gleichung A3

Hencky-Dehnung:

$$\varepsilon_w = \ln(1 + \varepsilon)$$

Gleichung A4

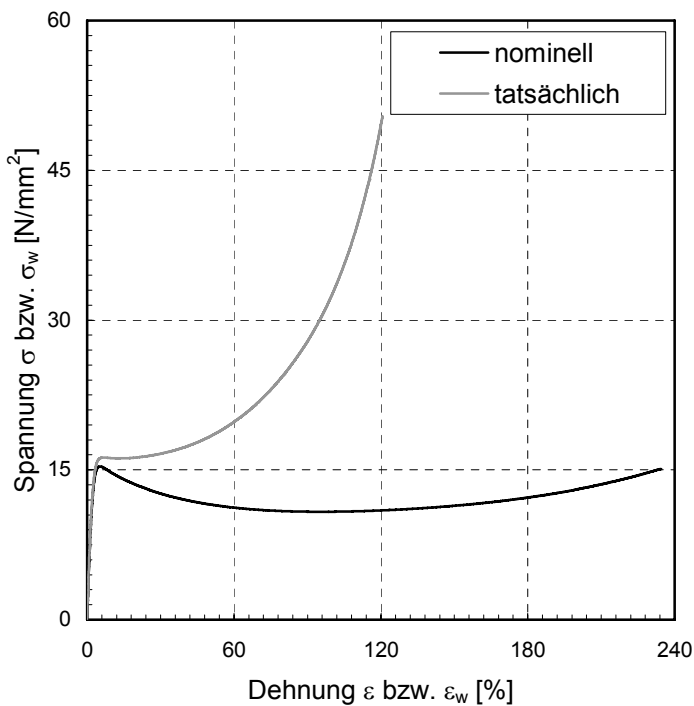


Bild A31 Zugspannungs-Dehnungs-Beziehung für den Photobond 4468, +23 °C, 50mm/min. Gegenüberstellung nomineller und tatsächlicher Spannungen und Dehnungen.